

UNIVERSIDADE DE LISBOA
FACULDADE DE CIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA GEOGRÁFICA, GEOFÍSICA E ENERGIA



Impacto dos Principais Modos de Variabilidade Climática na Potência Eólica em Portugal

João Monteiro Correia

Dissertação de Mestrado

Mestrado Integrado em Engenharia da Energia e do Ambiente

2015

UNIVERSIDADE DE LISBOA

FACULDADE DE CIÊNCIAS

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA GEOGRÁFICA, GEOFÍSICA E ENERGIA



Impacto dos Principais Modos de Variabilidade Climática na Potência Eólica em Portugal

João Monteiro Correia

Dissertação de Mestrado em Engenharia da Energia e do Ambiente

Dissertação de Mestrado orientada por:

Ricardo Trigo (IDL - FCUL)

Miguel Brito (FCUL)

Mestrado Integrado em Engenharia da Energia e do Ambiente

2015

Agradecimentos

Quero manifestar os meus agradecimentos pelo apoio neste percurso a várias pessoas, independentemente da natureza desse suporte.

Primeiramente, gostaria de mostrar o meu apreço pelos meus orientadores e conselheiros científicos:

Ao professor Ricardo Trigo devo-lhe a exposição a toda uma área de conhecimento, o rigor e a oportunidade de aprendizagem;

Ao professor Miguel Brito agradeço os contributos criativos e incisivos, assim como o apoio, presença e orientação clarificadora.

Obrigado.

À Ana Bastos, pela presença motivante, contributos técnico-esclarecedores e ajuda nas revisões finais, devo-lhe um grande agradecimento.

Gostaria também de agradecer ao Hélder e ao Pedro, do laboratório, pelo contributo que deram em determinadas tarefas.

Esta jornada não teria sido possível sem o apoio dos meus pais na minha formação pessoal. A eles um obrigado por o possibilitarem.

Agradeço também aos meus irmãos: ao Pedro, por me ter ido levar, e ao Abel, por me ter ido buscar.

Não posso deixar de fora uma linha de agradecimento à Raquel Ferreira e Ana Mestre: pela sua presença, apoio e o café que faz as melhores tertúlias de cozinha.

Estou grato pelas pessoas que me acompanharam nesta fase académica, por providenciarem um clima tranquilizante e estimulante. Incluo aqui amigos, a minha avó e toda a fauna social que me rodeia, fazendo parte do ambiente rico do qual estou agradecido.

Abstract

Many renewable energy power outputs are associated with the natural variability of different atmospheric variables, on many time-scales. The patterns of low-frequency climate variability, or climatic modes, influence the establishment of different atmospheric circulation regimes, from seasonal to multi-decadal time-scales, implicating that the study of these climate patterns is essential for different socio-economic activities including the assessment of the potential natural range of variability of different renewable energy production sources (wind, solar, waves). This work aims at evaluating the link between those large-scale circulation patterns and wind power, including its impact on conventional wind turbines. The three climate modes under focus are the North Atlantic Oscillation (NAO), the East Atlantic Pattern (EA) and the Scandinavian Pattern (SCAND). These modes are nowadays considered the most relevant large-scale circulation patterns for the climate of Southwestern Europe. This work also evaluates the interaction between the climatic modes, and its impact on wind energy production.

The increasing knowledge of the renewable energy sources' natural variability increases its potential predictability in different time-scales, bringing straight-forward benefits to the management of national energy grids.

Resumo

A potência de várias fontes de energia renovável está associada a diferentes variáveis meteorológicas, sujeitas a variabilidade natural em várias escalas temporais. Os padrões de variabilidade climática de baixa-frequência, ou modos climáticos, influenciam o estabelecimento de diferentes regimes de circulação atmosférica desde a escala intra-sazonal à escala multi-decadal, sendo o seu comportamento de particular importância para várias atividades humanas, incluindo a geração de energia renovável de diferentes origens (eólica, solar, ondas). O objetivo central deste estudo é o de avaliar a existência de uma ligação entre a variabilidade da potência eólica e certos modos climáticos bem como quantificar a sua importância em sistemas de produção de energia eólica. Os modos climáticos em estudo são: Oscilação do Atlântico Norte (*North Atlantic Oscillation*, NAO), padrão do Atlântico Este (*East Atlantic pattern*, EA) e o padrão da Escandinávia (*Scandinavian Pattern*, SCAND), sendo que são tendencialmente considerados os padrões de circulação atmosférica a larga-escala mais importantes para o clima do Sudoeste da Europa. São ainda avaliadas as interações entre estes três modos climáticos e o seu impacto na produção de energia.

O conhecimento sobre a variabilidade do recurso energético viabiliza potencialmente a sua predictabilidade, especialmente em escalas sazonais e interanuais, com evidentes benefícios para a gestão do parque energético nacional.

Key-Words: *North Atlantic Oscillation* (NAO); *East Atlantic Pattern* (EA); *Scandinavian Pattern* (SCAND); *Wind Power*; Portugal.

Índice

Agradecimentos.....	4
Abstract	5
Resumo.....	5
Key-Words:	5
Índices	6
Lista de Figuras	8
Lista de Tabelas.....	12
1. Introdução	13
1.1 Modos de Variabilidade Climática.....	13
1.2 Identificação dos Modos Climáticos	14
1.2.1 <i>North Atlantic Oscillation</i> (NAO).....	16
1.2.2 <i>East Atlantic Pattern</i> (EA)	18
1.2.3 <i>Scandinavian Pattern</i> (SCAND).....	19
1.3 Combinação de Modos.....	20
1.4 Persistência e predictabilidade dos modos climáticos.....	22
1.5 Impacto na potência eólica.....	24
2. Metodologia	26
2.1 Localização das estações de recolha de dados	26
2.2 Tratamento dos dados.....	26
2.3 Índices dos modos climáticos.....	28
2.4 Caracterização do estado médio das variáveis de acordo com os modos climáticos (e sua fase ou combinação de fases)	30
2.5 Correlações com as médias temporais das variáveis.....	30
2.6 Modelos de Regressão Linear (MLRM)	31
2.7 Curva de potência do aerogerador	32
2.8 Energia produzida (eólica Portugal).....	33
3. Resultados e Discussão	36

3.1	Climatologia para as localidades com as estações meteorológicas	36
3.2	Impacto dos modos de variabilidade climática na intensidade e potência eólica.....	39
3.3	Correlações com as médias temporais.....	44
3.3.1	Potência	46
3.3.2	Direção do Vento	48
3.4	Modos climáticos e energia eólica produzida (2008-2014)	51
3.4.1	Produção Mensal	51
3.4.2	Produção Anual	53
4.	Conclusões	55
5.	Referências	57
6.	Anexos.....	61

Lista de Figuras

Figura 1: Primeira EOF (componente espacial) das anomalias do campo da SLP no sector do Atlântico Norte para o Inverno (Dezembro – Março), período 1899 – 2006. Neste sector espacial, este padrão é associado ao modo climático NAO, sendo que neste caso explica 38.6 % da variação do parâmetro (SLP). Retirado de (Hurrell et al., 2003).....	15
Figura 2: Índices da NAO (média Inverno DJFM) construídos a partir da SLP, com diferentes metodologias. Os últimos dois índices são o mesmo método para diferentes domínios espaciais. Retirado de (Hurrell, 2003)	15
Figura 3: Padrão espacial da NAO. Período 1960 – 2000. Retirado de (Trigo et al., 2008).....	16
Figura 4: Climatologia da SLP (cor) e intensidade do vento (setas) para a fase positiva e negativa da NAO, respetivamente, como indicado no topo das figuras. As figuras são restritas ao Inverno extenso (Outubro-Março), para o período 1959 – 2007. Retirado de (Jerez et al., 2013)	16
Figura 5: Diferença, no Inverno (DJF), da SLP média (contornos) e vento a 1000 hPa (vectores seta) entre a fase positiva e a fase negativa da NAO (positiva menos negativa). O incremento da SLP por contorno é de 2 hPa. Valores negativos estão indicados pelos contornos a tracejado (à volta da zona da baixa pressão da Islândia/Ártico). Período 1958 – 2001. Retirado de (Hurrell, 2003)	17
Figura 6: Correlação entre a intensidade do vento e o índice da NAO para o Inverno extenso (Outubro-Março). Período 1960 – 2000. Retirado de (Trigo et al., 2008).....	17
Figura 7: Padrão espacial da EA. Período 1960 – 2000. Retirado de (Trigo et al., 2008).	18
Figura 8: Correlação entre a intensidade do vento e o índice da EA, para o Inverno extenso (Outubro-Março). Período 1960 – 2000. Retirado de (Trigo et al., 2008).....	18
Figura 9: Padrão espacial da SCAND. Período 1960 – 2000. Retirado de (Trigo et al., 2008).	19
Figura 10: Correlação entre a intensidade do vento e o índice da SCAND, para o Inverno extenso (Outubro-Março). Período 1960 – 2000. Retirado de (Trigo et al., 2008).	19
Figura 11: Correlações espaciais (padrões) entre a SLP e a NAO, para diferentes combinações de índices. Cada imagem tem indicada qual os modos combinados, e se é fase oposta (O) ou fase igual (S). Análise restrita ao Inverno (DJF). Amostra na ordem dos 51-57 Invernos, para cada combinação. Período 1902-2009. Retirado de (Comas-Bru & McDermott, 2013).....	20
Figura 12: Combinações entre NAO (1ª EOF) e EA (2ª EOF) (e também os modos no seu estado “puro”). Os vários painéis evidenciam o impacto na SLP de cada modo ou combinação (média mensal Inverno DJF). Período 1871 – 2008. Retirado de (Moore et al., 2013).....	21
Figura 13: Combinações entre NAO (1ª EOF) e SCAND (3ª EOF) (e também os modos no seu estado “puro”). Os vários painéis evidenciam o impacto na SLP de cada modo ou combinação (média mensal Inverno DJF). Período 1871 – 2008. Retirado de (Moore et al., 2013).....	21
Figura 14: Percentagem da variabilidade do campo da SLP (média) que é explicada pelos 3 modos em estudo. Invernos (DJF), para o período 1871 - 2008. Retirado de (Moore et al., 2013)	22

Figura 15: Intensidade de vento média (sombreado) e SLP (contornos). (a) Imagem da esquerda representa a fase positiva da NAO; (b) à direita, a situação da fase negativa da NAO. Média calculada para o período 1948 – 2008. Retirado de (Brayshaw et al., 2011).	24
Figura 16: Correlações temporais (sombreamento colorido) entre a potência eólica e (da coluna esquerda para a direita) a NAO, EA, SCAND e potência eólica modelada com recurso aos 3 modos simultaneamente (MLRM). Os contornos, nas primeiras 3 colunas, indicam a diferença entre a potência média da fase positiva e negativa, para os vários índices (% em relação à climatologia da potência). As correlações foram calculadas numa escala mensal e encontram-se apresentadas, de cima para baixo na figura, de acordo com o mês do Inverno em análise (M10 – Outubro; M3 – Março). Retirado de (Jerez & Trigo, 2013).	25
Figura 17: Índices mensais dos 3 modos climáticos para o período 2000-2012. Considera-se apenas o Inverno, caracterizado pelos meses entre Outubro e Março. As linhas a tracejado dividem as fases positivas e negativas da fase neutra. Adaptado de (CPC NOAA).	28
Figura 18: Curva de potência do aerogerador Vestas V90 – 3.0 MW.	32
Figura 19: A imagem da esquerda indica a localização dos Parques Eólicos em Portugal Continental (círculos coloridos), a sua capacidade (consoante a cor) e a localização das 9 estações para o qual se possuem dados (quadrado preto com centro branco). A imagem da direita indica o valor de capacidade eólica instalada, ou em construção, por distrito. Ambas as imagens representam informação à data de final de 2013 e contêm informação altimétrica de Portugal (padrões de cores na superfície). Retirado e adaptado de Energias Endógenas de Portugal, do seu relatório anual sobre Parques Eólicos em Portugal	35
Figura 20: Histogramas da intensidade do vento para Coimbra e Penhas Douradas. Sobreposto em ambos os histogramas está a curva de potência do aerogerador modelo.	37
Figura 21: Histogramas de potência para Coimbra (esquerda) e Penhas Douradas (direita) – Período: Invernos 2000-2012. Estes histogramas representam a climatologia da potência de cada um dos locais. O último escalão de potência engloba a frequência de todas as potências até à nominal – [450 – 3000] kW	37
Figura 22: Histogramas de frequência da intensidade do vento para Coimbra (coluna esquerda) e Penhas Douradas (coluna direita), por cada fase de cada modo. Os gráficos estão divididos por modos (1º NAO 2º EA 3º SCAND). Os histogramas, em cada gráfico, estão divididos por fase do modo, indicado por diferentes cores.....	39
Figura 23: Histogramas de potência para Coimbra (esquerda) e Penhas Douradas (direita), por cada fase de cada modo. Os gráficos estão divididos por modos (1º NAO 2º EA 3º SCAND). Os histogramas, em cada gráfico, estão divididos por fase do respetivo modo, indicado por diferentes cores. Na legenda é indicado também o número de meses usados para caracterizar cada fase.	41
Figura 24: Histogramas da intensidade do vento para Coimbra (esquerda) e Penhas Douradas (direita). Os histogramas estão divididos por cores, cada uma representando uma combinação entre fases de 2	

modos (NAO e EA). Ambos os histogramas têm sobreposta a curva de potência para o aerogerador modelado.	41
Figura 25: Histogramas da potência para Coimbra (esquerda) e Penhas Douradas (direita). Os histogramas estão divididos por cores, cada uma representando uma combinação entre fases de 2 modos (NAO e EA).	42
Figura 26: Igual à figura 24, relativo à combinação SCAND e EA.	43
Figura 27: Igual à figura 25, relativo à combinação SCAND e EA.	43
Figura 28: Variação de potência média associada a cada fase, para todos os modos, e a combinações de fases de modos diferentes (no total, 21 estados). A variação está expressa percentualmente, em relação à climatologia (média de cada local). Em cada caixa azul, a linha horizontal vermelha representa a mediana e os limites inferiores e superiores da caixa correspondem aos percentis 25 e 75 %.	44
Figura 29: Mapas com a localização das estações (círculos pretos). As estações com correlações estatisticamente significantes, para cada variável (intensidade, direção e potência), estão englobadas por linhas coloridas representando diferentes modos climáticos – NAO (verde), EA (vermelho), SCAND (azul). As linhas negras referem-se às estações com uma relação estatisticamente robusta com pelo menos dois modos climáticos, simultaneamente, relação evidenciada com modelos de regressão linear. O mapa da direita, já apresentado anteriormente com uma dimensão maior, indica a localização dos parques eólicos em Portugal.	45
Figura 30: Coeficientes de correlação entre a potência de cada local e o modo climático – à esquerda, NAO; à direita, EA (SCAND). Para Porto, Coimbra e Beja também se introduziu, à direita, a correlação entre a potência e a potência modelada (MLRM) com a inclusão de todos os modos como preditores, excepto para o Porto, que só inclui a NAO e a EA. O acréscimo no coeficiente de correlação, para estes 3 locais, está discriminado com um padrão de linhas pretas na diagonal. Período analisado 2000-2012, excepto Vila Real e Penhas Douradas cujo período foi 2001-2012.	46
Figura 32: Série temporal da potência observada em Coimbra com a potência modelada com a inclusão dos 3 modos como preditores e o correspondente coeficiente de correlação (Spearman) está apresentado. Mesmo período temporal que a Figura 33.	47
Figura 31: Séries temporais normalizadas: em cima à esquerda, NAO (azul) com intensidade de vento (vermelho); em cima à direita, NAO (azul) com potência (vermelho). Em baixo o mesmo mas com o modo EA. Também se indica o valor de cada coeficiente de correlação. Todas as séries, médias mensais, dizem respeito a Coimbra. Período 2000- 2012.	47
Figura 33: Coeficientes de correlação entre a direção média de cada local e o modo climático – à esquerda, NAO; à direita, EA (SCAND). No extremo direito estão, organizados da mesma maneira vertical, os coeficientes de correlação entre a direção e a potência em cada local. Período analisado igual ao da Figura 32.	48

Figura 34: Histogramas angulares da direção dos ventos, referente a Coimbra. O histograma central representa a climatologia do local no Inverno. Os histogramas laterais representam a diferença entre a fase positiva e a negativa para a NAO (esquerda) e a EA (direita). Nesses histogramas está discriminada a direção onde há aumento ou diminuição da frequência dos ventos, sendo que a cor vermelha (azul) indica um aumento da direção associado à fase positiva (negativa).	49
Figura 35: Histogramas angulares da direção dos ventos, referente a Vila Real (esquerda) e Penhas Douradas (direita). Os histogramas de cima representam a climatologia dos locais no Inverno. Os histogramas de baixo representam a diferença entre a fase positiva e fase negativa para EA. Nesses histogramas está discriminada a direção onde há aumento ou diminuição da frequência dos ventos, sendo que a cor vermelha (azul) indica um aumento da direção associado à fase positiva (negativa). Os histogramas das fases, para estes locais, podem ser consultados em anexo.	49
Figura 36: Histograma angular para as 4 combinações das fases positivas e negativas entre os modos NAO e EA. Em cima dos histogramas está indicada a combinação de fases. Referente a Coimbra, período 2000-2012.	50
Figura 37: Série temporal da energia eólica produzida mensalmente (observado – linha preta a tracejado; modelada – linha preta contínua); preditores usados no modelo: NAO (azul) e EA (vermelho), modos que foram usados como preditores. Período 2008 – 2014.	51
Figura 38: Magnitude máxima da variação de potência média (Período 2000-2012). Cada barra colorida representa um local diferente, consoante a cor indicada na legenda, exceto a barra preta. As barras pretas foram construídas com os dados da energia eólica produzida em Portugal, para um período diferente (2008-2014).	52
Figura 39: Série temporal da energia eólica produzida anualmente (observado – linha preta) mais EA (diferentes médias temporais, como indicado na legenda). Média temporal considerada - NDJFM. .	53

Lista de Tabelas

Tabela 1: Localização geral das estações de recolha dos dados usados; período temporal dos dados, assim como o usado para a análise; percentagem de cobertura para a intensidade e direção assim como a percentagem de dados inexistentes nos períodos de dados usados, entre parêntesis; na última coluna, o número de meses considerados.	27
Tabela 2: Número de ocorrências de cada fase de cada modo.	29
Tabela 3: Combinações de modos estudadas. Na segunda coluna estão indicadas que fases são combinadas, estando também indicado se a combinação é entre fases iguais ou opostas. Na terceira coluna está indicada a frequência média de cada combinação para o período 2000 – 2012. Essa frequência é calculada em relação a uma particular combinação de modos, como se pode ver pela quarta coluna.	29
Tabela 4: Capacidade eólica instalada em Portugal Continental (no final de cada ano) e crescimento percentual de ano para ano.	34
Tabela 5: Climatologia (média e desvio-padrão) da intensidade do vento e potência média de cada estação. A negrito estão realçadas as estações para o qual se apresentam mais resultados, posteriormente. Adicionalmente, são apresentados os valores extremos de intensidade de vento, assim como a altitude aproximada dos locais onde se situam as estações de registo.	36
Tabela 6: Fator de capacidade para cada estação.	38
Tabela 7: Para cada estação está apresentada o coeficiente de correlação entre cada modo individual e a potência; a amplitude máxima de potência em unidades de potência (kW) e percentagem (%). Realçados estão as correlações significativas a $p < 0.01$ (negrito), e a $p < 0.05$ (itálico, realçado com asterisco*)	45
Tabela 8: Correlações entre cada modo climático e a energia eólica produzida mensalmente para diferentes definições de Invernos. Apresenta-se também correlações (Pearson e Spearman) entre a série temporal da energia observada e a energia modelada com os índices de dois modos climáticos, para dois níveis de significância. Na última coluna está indicado o número de meses total considerado em cada caso de diferente média temporal.	52
Tabela 9: Correlações entre a EA e a energia produzida para diferentes definições de Inverno de ambas as séries. Resultados a negrito são significantes ao nível dos 99 %, a itálico ao nível dos 95 % e a sublinhado ao nível dos 90 %	54
Tabela 10: Produção eólica, expressa em horas de funcionamento à potência nominal (percentagem em relação à climatologia), associada à fase negativa e positiva da EA, para diferentes médias temporais. A última linha refere-se ao valor de produção eólica por Inverno (Novembro – Março).	54

1. Introdução

A transição para um modelo energético baseado em fontes de energia renováveis implica um maior conhecimento das variáveis naturais das quais depende o recurso energético a ser explorado. Estes recursos são caracterizados por considerável variabilidade espaço-temporal, pelo que é importante o estudo dos seus padrões de variabilidade, bem como os fenómenos físicos que os explicam.

O agregado das condições meteorológicas que ocorreram num local durante um período suficientemente longo (moldura temporal de tipicamente 30 anos) pode ser resumido pela média e variância do conjunto de variáveis que definem o clima desse local. São vários os parâmetros naturais que caracterizam o clima, sendo que a temperatura, precipitação, humidade, vento e pressão atmosférica são os mais comuns (IPCC 2007). Da mesma maneira, o tempo (meteorológico) é o valor instantâneo dessas condições, ou a média, numa escala de tempo muito menor.

A variabilidade climática é caracterizada em termos de anomalias – a diferença entre o estado instantâneo do sistema climático e a média climatológica. As anomalias reflectem-se com diferentes magnitudes espaciais e temporais em função dos distintos eventos meteorológicos ou padrões de circulação. Estes padrões de circulação podem ser analisados em escalas temporais variáveis, desde poucos dias, até semanas, meses, estações, anos ou escalas temporais mais longas (variabilidade climática a longo prazo). Em particular, a variabilidade de baixa-frequência refere-se às anomalias que duram tipicamente de várias semanas até vários meses ou mesmo anos – possuindo um carácter mais permanente que é relevante a nível da variabilidade sazonal, interanual e até inter-decadal (Barnston & Livezey, 1987; Wiser et al, 2011).

1.1 Modos de Variabilidade Climática

No regime da variabilidade de baixa-frequência no Hemisfério Norte, são conhecidos padrões de variabilidade interna da circulação atmosférica de larga-escala, doravante referidos como modos climáticos, que têm importância na variabilidade climática neste hemisfério. Devido à sua natureza de baixa-frequência, esses padrões são mais facilmente identificáveis e compreensíveis quando definidos a partir de médias temporais das variáveis na escala mensal ou sazonal, porque assim elimina-se o ruído associado a fenómenos meteorológicos e transientes que geralmente não estão associados à variabilidade em larga-escala (Hurrell, 2000).

A sua variação temporal, apesar de quantificável num índice de circulação, é tida como irregular. Outro nome recorrente para os modos de variabilidade é teleconexão, padrão de teleconexão, em referência às correlações espacialmente remotas que representam. Uma teleconexão representa uma relação entre anomalias climáticas de duas ou mais regiões distantes entre si – os centros de acção. O processamento e organização das relações existentes entre variáveis de vários locais diferentes permite a identificação dos padrões espaciais definidos pelas teleconexões mas relativamente bem definidos (Barnston & Livezey, 1987). No entanto, também estes padrões demonstram alguma variabilidade espacial à escalas sazonal (Hurrell & Deser, 2009) ou decadal (Moore et al, 2013).

Esses modos de baixa-frequência são de elevada importância para perceber a variabilidade espaço-temporal do clima à escala regional pois esta resulta de uma inter-relação complexa entre processos locais e a resposta a fenómenos de larga escala (IPCC 2013). Assim, a interacção entre as anomalias de larga-escala e a variabilidade sinóptica (horas-dias) pode ser não linear (Lionello et al., 2012). Isso indica que diferenças regionais desempenham um papel importante na resposta local face às anomalias de circulação de grande escala, e assim há a necessidade de estudar exhaustivamente este tipo de variabilidade. Isto também indica que algumas actividades humanas podem ser ajustadas espacialmente e temporalmente para uma menor vulnerabilidade a perturbações de larga-escala. As alterações que os modos climáticos provocam na circulação atmosférica e oceânica têm efeitos relevantes, directos ou indirectos, para várias actividades humanas – desde a produção de energia até à agricultura – através do seu impacto nos campos de pressão e temperatura, na localização, direcção e intensidade de regimes de vento e, consequentemente, na nebulosidade e precipitação, bem como na

ocorrência de fenómenos extremos. (Dodet et al., 2009; Trigo et al., 2008; Vicente-Serrano et al., 2011; Jerez & Trigo, 2013; Lionello et al.; Jerez et al., 2013; IPCC 2007)

As correlações de anomalias entre dois locais pode dar-se em simultâneo ou com desfasamento temporal (*lag* or *lead*, consoante a perspectiva). O facto de poder haver correlações desfasadas no tempo entre anomalias climáticas de duas regiões oferece a possibilidade de predictabilidade do estado meteorológico aproximado, através da magnitude das anomalias associadas e da fase dos modos de variabilidade. Esta perspectiva de antevisão, como se elaborará mais à frente, pode aplicar-se para se tentar prever o estado de um modo climático; ou para, dado um certo estado de um modo climático, tentar prever as anomalias climáticas que se vão estabelecer.

1.2 Identificação dos Modos Climáticos

A identificação dos padrões de variabilidade pode ser feita com abordagens e métodos estatísticos diferentes. Os campos meteorológicos mais usados para essa identificação são tipicamente a pressão ao nível do mar (*Sea Level Pressure*, SLP), a altura geopotencial de superfícies isobáricas como os 700 hPa ou 500 hPa, ou mesmo a temperatura da superfície oceânica (*Sea Surface Temperature*, SST). (Barnston & Livezey, 1987; Deser et al., 2009).

Já foram identificados vários modos climáticos: desde modos globais (p.e. *El Nino Southern Oscillation*) a modos mais regionais (p.e. os modos climáticos desde estudo), no que toca à expressão das anomalias. Da mesma forma, há modos climáticos com períodos mais longos e outros com períodos mais curtos. Esses modos são continuamente monitorizados e são construídos índices de anomalias referentes a cada modo. O Centro de Previsão do Clima (traduzido do inglês *Climate Prediction Center*, CPC) do Serviço Nacional de Meteorologia dos Estados Unidos (*National Weather Service*, uma das agências da *National Oceanic and Atmospheric Administration*) produz e armazena dados meteorológicos e climáticos – incluindo os índices e padrão espacial de vários modos climáticos. A monitorização que esse centro executa é de extrema utilidade e uma referência no estudo do clima sendo que, como se irá mencionar posteriormente, utilizaram-se e consultaram-se dados expostos no sítio (*site*) do CPC.

A SLP é usada para a construção de índices de anomalias, quando se possui um registo temporal da variável em dois ou mais locais. Esses índices (*station-based*) são construídos com base na diferença, entre dois locais, da SLP normalizada. Para um dado instante temporal, o valor do índice pode ser positivo ou negativo – assim, a expressão dos modos climáticos é dividida numa fase positiva e numa fase negativa. No entanto, valores de anomalias de menor magnitude (valor do índice próximo de zero), em ambas as fases, são normalmente desconsiderados por corresponderem a uma fase neutra ou intermédia do modo. Esta abordagem está muito dependente das localizações das estações de recolha de dados escolhidas para a construção do índice de circulação, pelo que se usam normalmente localizações perto dos centros de acção. No entanto, esta abordagem não tem em consideração as translações dos centros de acção, nem consideram a distinção entre os efeitos dos modos climáticos e outros fenómenos meteorológicos/transientes (Hurrell, 2003). Assim, ganha importância o segundo tipo de abordagem na identificação dos modos climáticos - a aplicação de métodos matemáticas computacionais, como a análise de componentes principais (*Principal Component Analysis*, PCA na nomenclatura inglesa), aos campos de variáveis (rede espacial de variáveis). Mais especificamente, às múltiplas observações existentes desses campos ao longo de um período de tempo (série temporal). Esta técnica decompõe os dados em vários componentes independentes para encontrar padrões de flutuações/variações no espaço e no tempo (Wilks, 2006). A componente espacial é capturada nas funções ortogonais empíricas (*EOF* Empirical Orthogonal Functions) – ver Figura 1, exemplo. As EOFs principais explicam uma parte significativa da variabilidade das observações e fornecem informação espacial sobre a localização dos centros de acção das teleconexões, podendo ser esta monopolar, dipolar ou multipolar.

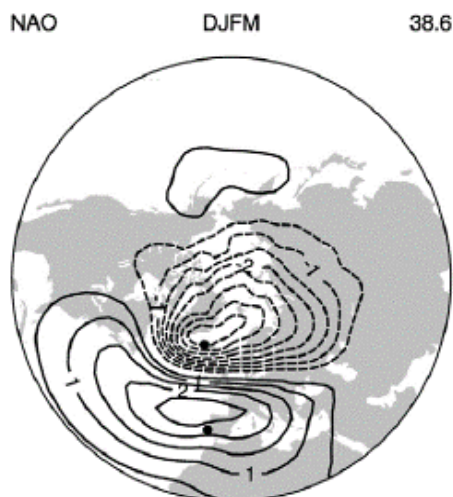


Figura 1: Primeira EOF (componente espacial) das anomalias do campo da SLP no sector do Atlântico Norte para o Inverno (Dezembro – Março), período 1899 – 2006. Neste sector espacial, este padrão é associado ao modo climático NAO, sendo que neste caso explica 38.6 % da variação do parâmetro (SLP). Retirado de (Hurrell et al., 2003)

Os modos identificados com ambas as abordagens costumam ser coerentes entre si, embora se note alguma deslocação geográfica dos padrões de acção consoante vários fatores, como: a abrangência temporal dos dados considerados (ex: quantos meses caracterizam um Inverno); o domínio espacial considerado e também o período de tempo que se escolhe analisar; o que pode explicar pequenas diferenças na variância explicada pelos mesmos modos climáticos. Assim, a análise e comparação de qualquer resultado tem que ser feita tendo em consideração esses fatores mencionados.

Na Figura 2, retirada de Hurrell (2003), pode observar-se os vários índices de circulação (normalizados) de um modo climático (NAO), construídos com recurso às duas abordagens mencionadas. O primeiro índice é construído com a primeira abordagem (diferença de pressão entre Lisboa, Portugal e Reykjavik, Islândia). Os outros dois foram construídos com a segunda abordagem, para domínios espaciais ligeiramente diferentes – o 2º índice usa o domínio latitudinal do Atlântico Norte e o 3º índice, todo o Hemisfério Norte (mais vasto). Apesar de se verificarem algumas diferenças, a evolução temporal do índice é semelhante, demonstrando coerência entre as abordagens de identificação do modo climático.

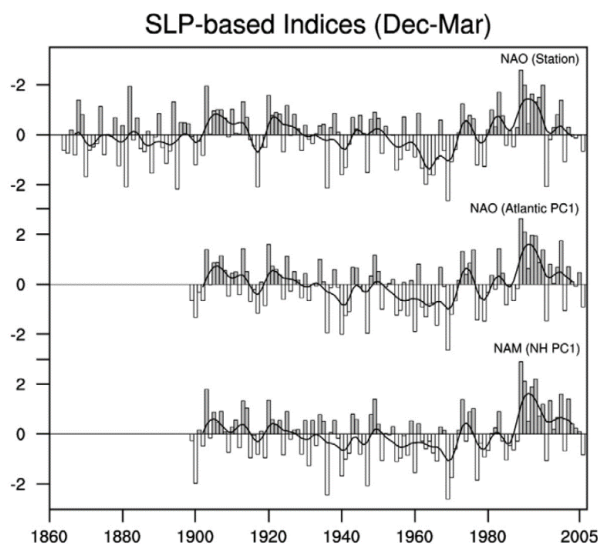


Figura 2: Índices da NAO (média Inverno DJFM) construídos a partir da SLP, com diferentes metodologias. Os últimos dois índices são o mesmo método para diferentes domínios espaciais. Retirado de (Hurrell, 2003)

Como indicado no presente trabalho, irá restringir-se este estudo a 3 modos climáticos, os mais proeminentes na zona do Hemisfério Norte – sector Atlântico/Europa, e que explicam a maior parte da variabilidade sazonal e interanual do clima Europeu (Trigo et al, 2008; Moore et al., 2013; IPCC 2007)

1.2.1 North Atlantic Oscillation (NAO)

A Oscilação do Atlântico Norte (*North Atlantic Oscillation*, doravante referido pelo acrónimo NAO) é o modo climático mais proeminente e recorrente no Hemisfério Norte, liderando a variabilidade atmosférica neste hemisfério (Barnston & Livezey, 1987) (Hurrell & Deser, 2009). É um modo dipolar de variabilidade climática com dois centros de acção, anti-correlacionados, essencialmente distanciados meridionalmente. Estes centros de acção estão sensivelmente localizados sobre dois sistemas de pressão semi-permanentes – anticiclone dos Açores (alta pressão) e depressão da Islândia (baixa pressão). Os índices da NAO foram inicialmente construídos a partir da diferença de pressão normalizada entre duas estações, tipicamente uma na Islândia e outra nos Açores. Assim, a NAO pode ser considerada a variação relativa entre estes dois sistemas de pressão.

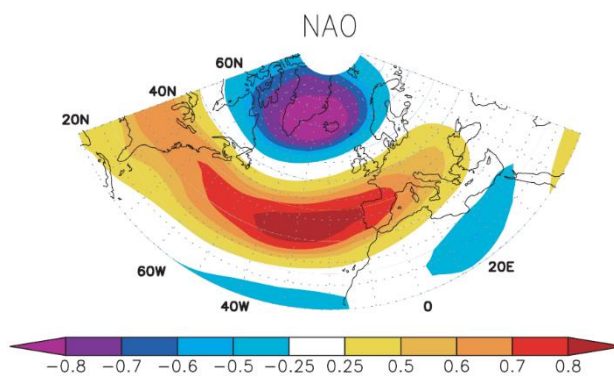


Figura 3: Padrão espacial da NAO. Período 1960 – 2000. Retirado de (Trigo et al., 2008).

A NAO também pode ser caracterizada através de uma análise por PCA ao campo SLP do Atlântico Norte, correspondendo à 1ª componente principal. De acordo com vários autores que usaram bases de dados distintas e períodos variados e longos (várias décadas), a 1ª EOF representa cerca de 35 % da variância do campo da SLP no Inverno do Hemisfério Norte (Moore et al., 2013) (Comas-Bru & McDermott, 2013). O padrão espacial da NAO pode ser observado na Figura 3.

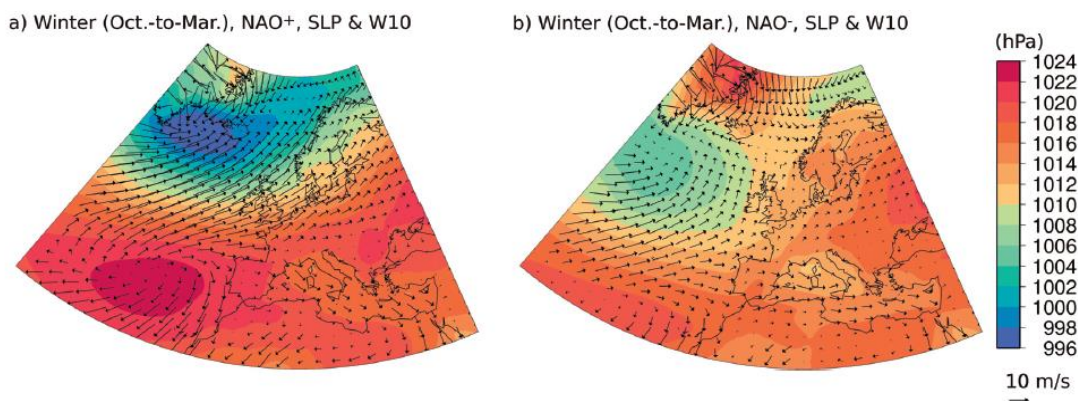


Figura 4: Climatologia da SLP (cor) e intensidade do vento (setas) para a fase positiva e negativa da NAO, respetivamente, como indicado no topo das figuras. As figuras são restritas ao Inverno estenso (Outubro-Março), para o período 1959 – 2007. Retirado de (Jerez et al., 2013)

Entre os dois centros de acção, centrados a latitudes distintas, desenvolve-se uma linha ou banda nodal de fraca ou nula correlação, como se pode verificar na Figura 3. A fase positiva da NAO (Figura 4, esquerda) é caracterizada por um forte gradiente meridional de pressão no sector Atlântico Norte, resultante de um reforço nas sistemas de pressão existentes nos centros de acção do modo. Como se pode ver pela Figura 4, os ventos sobre o Atlântico são mais intensos na fase positiva do que na fase negativa (Figura 4, direita; e Figura 5). A fase negativa corresponde a uma situação de diluição desse gradiente meridional de pressão.

Quanto maior o gradiente meridional de pressão, mais próximas estão as isóbaras e mais intensos são os ventos que atingem a Europa do Norte (Figuras 4 e 5). Quanto menor o gradiente, mais fracos são as forças de gradiente de pressão e menos intenso é o regime de circulação zonal. Através da variação na estrutura atmosférica, a transição entre fases da NAO contribui para a modulação das trajetórias das depressões e, através de variações de transporte de calor e humidade, provoca alterações dos padrões de temperatura e precipitação em escala continental (CPC NOAA; Hurrell, 2003; IPCC 2007).

No Mediterrâneo/Sudoeste da Europa destaca-se uma anomalia de fluxo, especialmente a nível da direção (ventos de norte-nordeste, consoante a proximidade do centro Sul). Em Portugal, a fase positiva da NAO representa uma circulação ao largo do litoral (N-NW). A fase negativa da NAO traz ventos perpendiculares à costa, que estão associados a um incremento da nebulosidade e precipitação (Jerez et al., 2013). De destacar as imediações do Reino Unido/Europa Noroeste, que verifica ventos intensos e uma considerável variabilidade entre fases. Essa diferença entre a fase positiva e a negativa no Atlântico Norte e Europa Atlântica/Ocidental é significativa, e mais evidente nesse corredor entre os centros de pressão, como se pode ver pela Figura 5 (Hurrell, J., 2003).

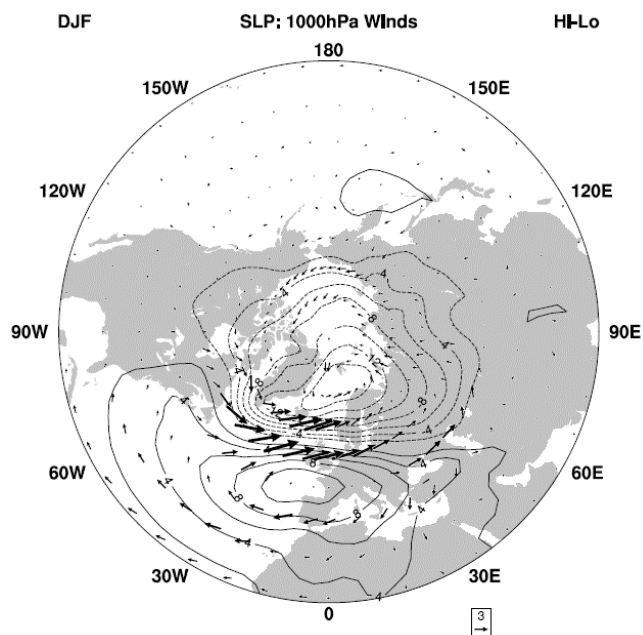


Figura 5: Diferença, no Inverno (DJF), da SLP média (contornos) e vento a 1000 hPa (vectores seta) entre a fase positiva e a fase negativa da NAO (positiva menos negativa). O incremento da SLP por contorno é de 2 hPa. Valores negativos estão indicados pelos contornos a tracejado (à volta da zona da baixa pressão da Islândia/Ártico). Período 1958 – 2001. Retirado de (Hurrell, 2003)

A localização desse corredor é coerente com os resultados em Trigo et al. (2008) para a correlação espacial entre a velocidade do vento e a NAO, de Inverno, que situa também numa banda latitudinal ao largo do Reino Unido as maiores correlações entre a NAO e a velocidade do vento – Figura 6.

Os centros de acção da NAO demonstram variabilidade espacial a uma escala interanual e multi-decadal, indicando que o estudo deste modo deve ser sempre enquadrado num contexto temporal. Moore et al. (2013) também mostrou que parte da variabilidade observada nos padrões da NAO está relacionada com outros modos de variabilidade climática, descritos de seguida.

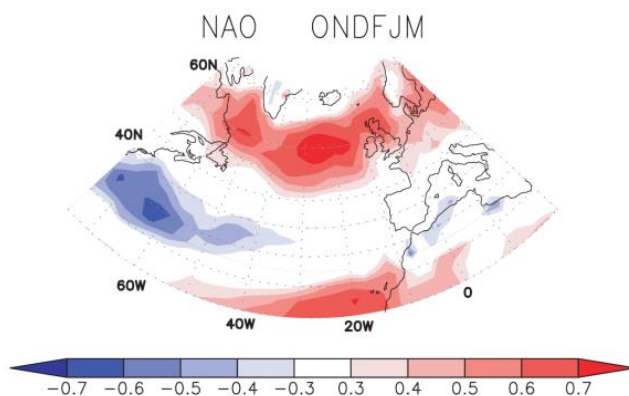


Figura 6: Correlação entre a intensidade do vento e o índice da NAO para o Inverno extenso (Outubro-Março). Período 1960 – 2000. Retirado de (Trigo et al., 2008).

1.2.2 East Atlantic Pattern (EA)

O segundo modo de variabilidade atmosférica mais importante no sector do Atlântico Norte/Europa é o padrão do Atlântico Este (*East Atlantic pattern*, EA). É definido por Barnston & Livezey (1987) por um centro principal perto dos 55° N e 20-35° W (Oeste da Irlanda). No entanto, a monitorização feita pelo CPC identifica a EA como sendo, à semelhança da NAO, um modo essencialmente dipolar cujos centros de acção estão meridionalmente afastados, como se pode verificar pela Figura 7. Nesse sentido, a diferença mais evidente é a localização de todo o padrão espacial cerca de 15° mais a Sul, em relação ao que se verificou para a NAO.

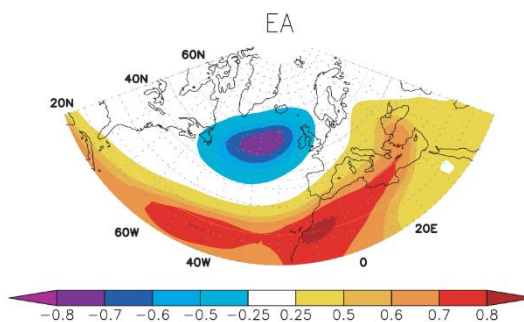


Figura 7: Padrão espacial da EA. Período 1960 – 2000. Retirado de (Trigo et al., 2008).

De acordo com vários autores que usaram bases de dados distintas e períodos variados, a 2ª EOF representa cerca de 18 % da variância do campo da SLP no Inverno do Hemisfério Norte (Moore et al., 2013; Comas-Bru & McDermott, 2013).

Pelo facto de a NAO ser um padrão evidente ao longo do ano inteiro e explicar mais variabilidade a nível das anomalias no hemisfério norte, a literatura sobre este modo climático é mais extensa do que a de outros modos. No entanto, à semelhança da NAO, o padrão da EA é responsável por diversos impactos na precipitação e temperatura associados ao seu índice (Trigo et al., 2008). Em Murphy & Washington (2001), por exemplo, a EA explica melhor os padrões de variabilidade da precipitação para o Reino Unido e Irlanda do que a NAO, ilustrando assim os diferentes domínios espaciais dos diferentes modos climáticos.

Note-se que, para este modo, a banda latitudinal associada a correlações fortes com a intensidade do vento localiza-se próxima das latitudes do Norte de Portugal/Península Ibérica – França Central, havendo uma “mancha” no Noroeste da Península Ibérica – Figura 8. De notar também que o centro de acção Norte deste modo situa-se na banda zonal entre os centros da NAO, identificada anteriormente. Este centro de acção é também tido como espacialmente semelhante ao chamado *Atlantic Ridge*, um sistema de alta pressão ocorrente – um regime atmosférico (Hurrell & Deser, 2009; Comas-Bru and McDermott, 2013; Cassou, 2008). Em Moore et al (2013) é demonstrada também a existência de uma variabilidade multidecadal nos padrões da EA.

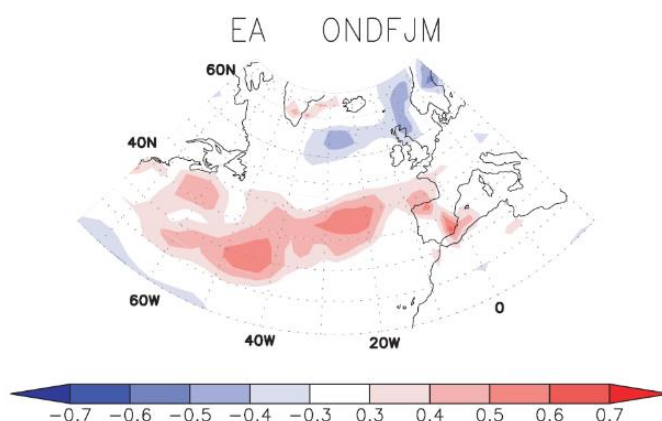


Figura 8: Correlação entre a intensidade do vento e o índice da EA, para o Inverno extenso (Outubro-Março). Período 1960 – 2000. Retirado de (Trigo et al., 2008).

1.2.3 Scandinavian Pattern (SCAND)

O terceiro modo de variabilidade atmosférica no sector do Atlântico Norte/Europa é o padrão da Escandinávia (*Scandinavian pattern*, SCAND). É definido por um centro de acção primário na zona da Escandinávia/mar do Norte, mais um centro fraco de sinal oposto na Europa Ocidental – Figura 9.

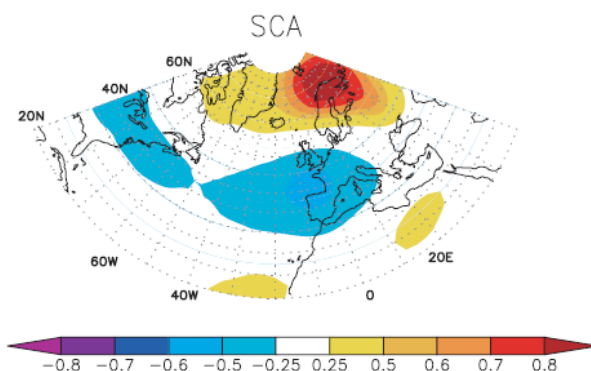


Figura 9: Padrão espacial da SCAND. Período 1960 – 2000. Retirado de (Trigo et al., 2008).

De acordo com vários autores que usaram bases de dados distintas e períodos variados, a 3ª EOF representa cerca de 15 % da variação total do campo da SLP no Inverno do Hemisfério Norte (Moore et al., 2013; Comas-Bru & McDermott; 2013). Ao contrário dos outros modos climáticos abordados anteriormente, o padrão espacial da SCAND da figura 9 não verifica uma parecência evidente com os padrões obtidos em Moore et al. (2013) e Comas-Bru & McDermott (2013). O padrão dessa figura, retirada de Trigo et al., (2008), é semelhante com o padrão espacial retirado de CPC, não apresentado aqui. Ambos são obtidos com base em anomalias na altura geopotencial – no caso do CPC e Trigo et al. (2008), aos 500 mb. Como está indicado em Wallace & Gutzler (1981), a aplicação de uma mesma metodologia de análise à altura geopotencial (500 mb) em vez de SLP resulta num conjunto mais complexa de teleconexões. A SCAND é, dos modos abordados, aquele com uma expressão mais continental (Trigo et al., 2008). As diferenças também podem advir do diferentes períodos de amostragem (período dos meses e número de anos e o período dos anos). Adicionalmente Moore et al (2013) indica que a análise de cada modo individual tem que ser feita tendo em conta a fase dos outros modos para se poder avaliar a “pureza” do seu sinal.

A SCAND, apesar de menos proeminente, também está associado a anomalias na temperatura e precipitação e regime de ventos na Europa. De interesse, também, é a semelhança entre a fase positiva da SCAND e um regime de bloqueio, identificado em Hurrell & Deser (2009) e Trigo et al. (2008). A fase positiva da SCAND está associada a anomalias negativas de temperatura na Europa Ocidental e anomalias negativas de precipitação na Escandinávia (Trigo et al., 2008). Na Figura 10 pode-se observar o padrão espacial de correlações entre o índice da SCAND e a intensidade do vento, para o Inverno. À semelhança dos modos anteriores, a correlação é mais elevada numa banda entre os dois centros da SCAND.

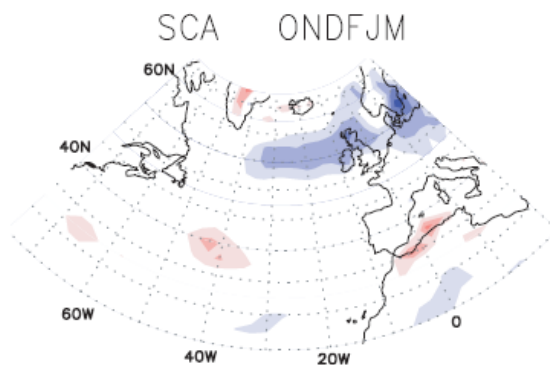


Figura 10: Correlação entre a intensidade do vento e o índice da SCAND, para o Inverno extenso (Outubro-Março). Período 1960 – 2000. Retirado de (Trigo et al., 2008).

1.3 Combinação de Modos

Da mesma maneira que se estuda o impacto no clima das fases de diferentes modos de variabilidade de circulação atmosférica, pode-se estudar a variação da estrutura atmosférica perante a presença de fases activas de mais do que um modo. Os modos podem interagir entre si, resultando em estruturas espaciais modificadas. Para avaliar as modificações da estrutura da NAO na sua associação com outros modos, Comas-Bru & McDermott (2013) estudaram mais de 50 Invernos para cada combinação da NAO-EA e NAO-SCAND, como se pode observar na Figura 11:

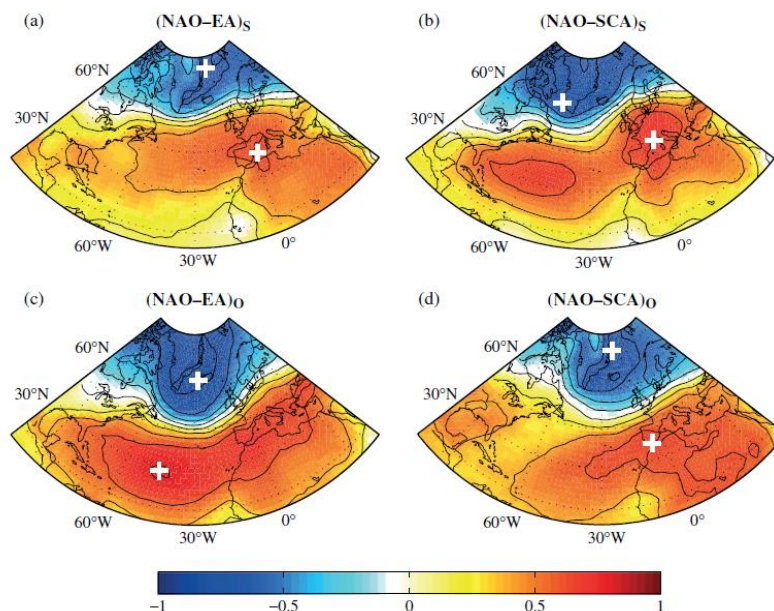


Figura 11: Correlações espaciais (padrões) entre a SLP e a NAO, para diferentes combinações de índices. Cada imagem tem indicada qual os modos combinados, e se é fase oposta (O) ou fase igual (S). Análise restrita ao Inverno (DJF). Amostra na ordem dos 51-57 Invernos, para cada combinação. Período 1902-2009. Retirado de (Comas-Bru & McDermott, 2013).

Estas imagens traduzem a variabilidade espacial das correlações das anomalias de SLP com a NAO, consoante os modos considerados, e a combinação das suas fases (combinação com fases opostas ou combinação com fases iguais). De notar que as bandas zonais distinguidas anteriormente para os modos individuais demonstram uma variabilidade geográfica significativa.

Em Moore et al. (2013), é providenciado um padrão espacial da correlação com anomalias, para cada uma das combinações mencionadas (Figuras 12 e 13), sugerindo que uma descrição completa da variabilidade no sector Hemisfério Norte Europa/Atlântico tem que considerar os vários modos em discussão. O estudo de como os modos se combinam é também importante, de acordo com o mesmo estudo, para se perceber melhor a oscilação/padrão de cada modo individual, isto é, a expressão não adulterada (“pura”) de cada modo climático. Nesse estudo, o padrão espacial obtido para a SCAND é o padrão apresentado na linha central da Figura 13 (fases positiva e negativa). Este padrão é especialmente mais coerente com o regime de bloqueio apresentado em Hurrell & Deser (2009) e, ao contrário do que se passa para a NAO e para EA, difere dos padrões obtidos por Trigo et al. (2008) e pelo CPC. Isto indica que a combinação de modos altera os padrões espaciais dos modos individualmente, sendo que a Figura 13 evidencia diferentes variantes da SCAND consoante a combinação. Este facto parece constituir uma explicação adicional (e pouco mencionada na literatura) para alguma da variação dos padrões espaciais dos modos que se verifica entre diferentes estudos.

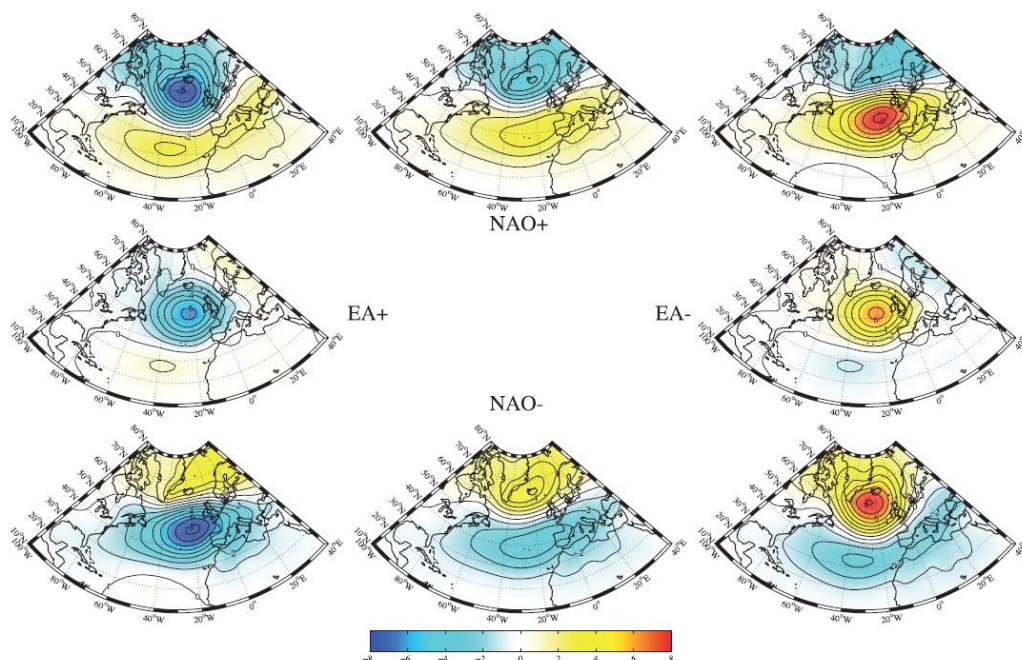


Figura 12: Combinações entre NAO (1ª EOF) e EA (2ª EOF) (e também os modos no seu estado “puro”). Os vários painéis evidenciam o impacto na SLP de cada modo ou combinação (média mensal Inverno DJF). Período 1871 – 2008. Retirado de (Moore et al., 2013).

Na Figura 12, pode-se verificar a interação entre as diferentes fases para a combinação NAO com EA. Relembrando o padrão espacial da EA, verifica-se que o seu centro de acção mais forte se situa sensivelmente ao longo da linha de correlação zero (zona entre os dois centros de acção) entre os centros de acção da NAO, o que manifesta visualmente a importância da combinação entre a NAO e EA na formação de uma estrutura de anomalias. Isto denota que entre os modos pode haver um processo de atenuação ou amplificação das anomalias e, assim, atenuar ou realçar os efeitos meteorológicos associados à expressão das diferentes fases dos modos. Comas-Bru & McDermott (2013) concluem que o posicionamento relativo da EA em relação à NAO pode afectar a intensidade e localização latitudinal dos ventos de Oeste (*westerlies*).

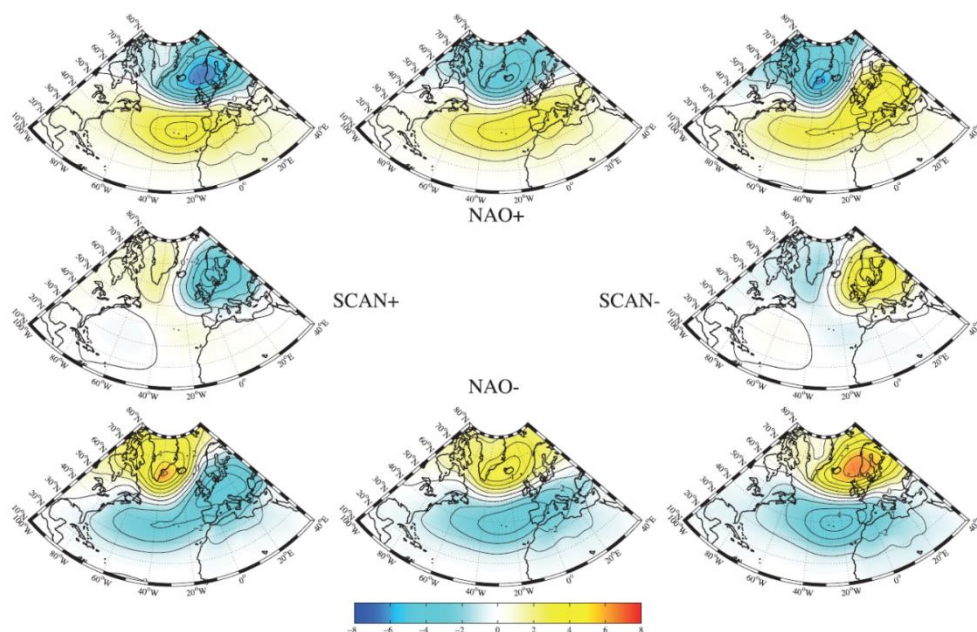


Figura 13: Combinações entre NAO (1ª EOF) e SCAND (3ª EOF) (e também os modos no seu estado “puro”). Os vários painéis evidenciam o impacto na SLP de cada modo ou combinação (média mensal Inverno DJF). Período 1871 – 2008. Retirado de (Moore et al., 2013).

De notar que diferentes combinações entre a NAO e tanto a EA como a SCAND resultam sempre num dipolo meridional da pressão (SLP) no Atlântico.

Na Figura 14 apresenta-se a percentagem de variabilidade do campo da SLP no Inverno (média mensal de DJF) explicada pelos índices dos 3 modos.

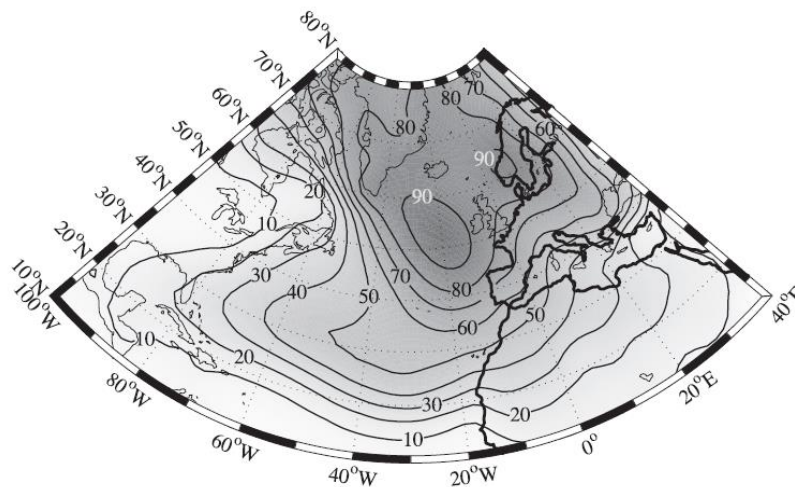


Figura 14: Percentagem da variabilidade do campo da SLP (média) que é explicada pelos 3 modos em estudo. Invernos (DJF), para o período 1871 - 2008. Retirado de (Moore et al., 2013)

O padrão espacial definido na Figura 14 exprime a importância combinada dos modos climáticos no Atlântico Norte e Europa (especialmente Europa Ocidental). Como se pode observar, a variabilidade dos 3 modos climáticos explica a maioria da variabilidade numa grande área do domínio.

1.4 Persistência e Predictabilidade dos modos climáticos

Um dos primeiros estudos extensivos sobre os modos climáticos, Barnston & Livezey (1987), aborda o carácter persistente dos modos climáticos – quando os padrões dos modos em diferentes meses do Inverno são parecidos, isso indica uma certa predictabilidade. Ou seja, uma anomalia persistente numa escala semanal indica uma persistência e/ou evolução dessa anomalia num período de tempo maior. Em Barnston & Livezey (1987), essa persistência foi estudada através da avaliação da correspondência entre a média das anomalias da altura geopotencial durante um período de 10 dias com a média mensal das anomalias da mesma variável durante um período de um mês.

À escala multidecadal, os modos também podem passar períodos de anos ou décadas predominantemente numa fase, pelo que é possível que a lógica de interação entre modos discutida no capítulo anterior tenha esta abrangência temporal. Moore et al. (2013) demonstrou também nessa escala temporal translações dos centros de acção dos 3 modos em discussão.

Polyakova et al. (2006) apresentam resultados que indicam falta de estacionaridade na relação entre a NAO e alguns parâmetros climáticos (SST, SLP), para escalas longas (multidecadal). O modo climático passa por períodos de estabilidade e por períodos em que oscila. Isto indica que, apesar de metodologias semelhantes, a comparação de resultados que caracterizem um modo tem que ter em conta os distintos períodos usados para caracterizar o modo. Por isso, relações significativas encontradas com janelas temporais de amostragem mais longas são geralmente mais representativas do que relações obtidas com períodos mais curtos. Tendo em conta a vulnerabilidade humana às variações climáticas, o conhecimento de relações oscilantes numa escala decadal oferece oportunidades de adaptação e resiliência.

A predictibilidade dos modos climáticos pode ser categorizada com diferentes abordagens: Se houver desfasamentos temporais (relações *lag*) numa cadeia de causalidades entre diferentes anomalias a partir de uma anomalia “inicial” associada a um modo climático, o impacto dos modos adquire um potencial preditivo de antecipação. Por exemplo, o escoamento de alguns rios europeus está relacionado com a NAO através do impacto desse modo na precipitação e subsequente abastecimento das bacias hidrográficas, que mais tarde origina um maior caudal dos rios alimentados por essa bacias. Assim, a informação acerca de um estado da NAO numa dada altura do ano fornece uma previsão do caudal dos rios para semanas/meses, devido ao *lag* precipitação-caudal da resposta hidrológica (Trigo et al., 2004; Bierkens & van Beek, 2009; Šípek, 2013)

O desfasamento temporal entre um modo e a expressão de anomalias pode, no entanto, ser nulo ou reduzido – por exemplo, apesar de haver uma correlação entre a NAO e uma ou mais variáveis meteorológicas, esta correlação dá-se de forma simultânea. Neste tipo de situações, a predictabilidade que se deseja é a o conhecimento prévio da fase/tendência do modo em análise, meses antes. Neste domínio, já se estudaram relações desfasadas entre diferentes modos climáticos, que também poderão ser fontes de predictabilidade (Cassou, 2008; Brönnimann et al, 2006). Além dessas, outras fontes de predictabilidade já foram estudadas, especialmente para a NAO, tais como elementos da criosfera (gelos marinhos, neve) e anomalias das SST em diferentes zonas oceânicas (Czaja & Frankignoul, 2001; Frankignoul & Kestenare, 2005; García-Serrano & Frankignoul, 2014; Brands et al., 2012) mas não só. Para a EA, também anomalias da SST em zonas do Pacífico e Índico podem ser enquadradas num modelo de previsão a 1 - 2 meses (Iglesias et al., 2014; Rodwell & Folland, 2002). A interação entre anomalias de diferentes subsistemas (atmosfera, criosfera, oceano) indica que, apesar dos diferentes tempos de resposta destes componentes do sistema climático, o sinal da atmosfera pode ser influenciado pelo oceano, que fora anteriormente influenciado pelo estado atmosférico (Iglesias et al., 2014; Hermanson & Sutton, 2009; Cassou, 2008). O oceano tem, em relação à atmosfera, uma memória maior, o que poderá indicar que, em escalas de tempo mais longas, o forçamento inicial advém desta componente (Peings & Magnusdottir, 2014). Alexander et al. (2002) exploram a atmosfera como o elemento de ligação entre anomalias em diferentes oceanos (Sutton & Hodson, 2003; Vitart et al., 2012).

1.5 Impacto na Potência Eólica

Se a tendência civilizacional de transição para sistemas energéticos renováveis continuar, o conhecimento do comportamento atmosférico terá que ser mais aprofundado no que se refere às anomalias da circulação atmosférica existentes em várias escalas temporais e espaciais.

Alguns trabalhos publicados (Brayshaw et al., 2011; Jerez et al., 2013; Jerez & Trigo, 2013) abordam a hipótese de que os impactos dos modos na climatologia dos ventos são suficientemente importantes para serem tidos em conta, no que toca à produção de energia renovável. De acordo com estes autores a variabilidade interanual dos modos climáticos potencialmente implica uma variabilidade da potência média mensal, sazonal. No entanto, os modos climáticos podem também estar associados a impactos numa escala temporal menor. Couto et al. (2014) estudou o impacto de regimes de vento no *forecast* de rampas de potência eólica em Portugal. Um dos 6 cenários construídos para caracterizar diferentes regimes de vento é bastante semelhante com o padrão da EA. Esse regime está associado a uma maior produção eólica. Em Brayshaw et al. (2011), para o Reino Unido, é apresentado o significativo impacto da NAO na potência eólica média horária, diária e mensal. No Reino Unido, a fase positiva da NAO (Figura 15, esquerda) corresponde à fase mais energética no que toca à potência eólica média, registando-se um valor de potência 10-15 % superior à fase negativa da NAO (Figura 15, direita). Nesta imagem, à semelhança de Trigo et al. (2008), é observável uma faixa zonal de variação da intensidade de vento, aqui associada a um maior gradiente meridional de pressão (capturado no índice NAO).

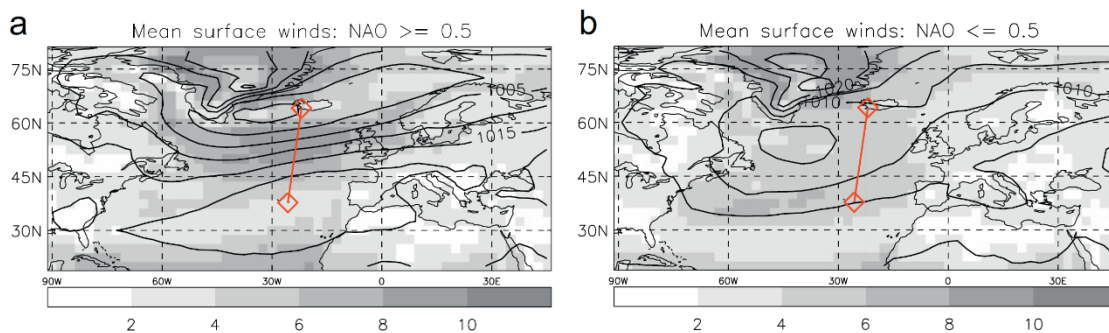


Figura 15: Intensidade de vento média (sombreado) e SLP (contornos). (a) Imagem da esquerda representa a fase positiva da NAO; (b) à direita, a situação da fase negativa da NAO. Média calculada para o período 1948 – 2008. Retirado de (Brayshaw et al., 2011).

Brayshaw et al. (2011) gerou condições de vento de acordo com os diferentes estados da NAO e averiguou a sua diferença nos histogramas de potência eólica em diferentes escalas temporais (horário, diário, 10 dias e um mês), sugerindo a exploração de abordagens semelhantes para outros recursos renováveis e/ou com o foco em outros padrões de circulação a larga escala, tais como os modos climáticos abordados neste trabalho.

Dado que a Península Ibérica é afectada por diferentes regimes de vento, dependentes em grande medida dos modos climáticos, é interessante quantificar o seu impacto na produção eólica a partir do estudo da variação das intensidades médias do vento e do seu zoneamento geográfico regional na Península Ibérica. Os resultados de Jerez & Trigo (2013) sugerem um papel mais interventivo dos modos climáticos apresentados à escala interanual. Como se poderá observar posteriormente, dada a relativa concentração da potência eólica, certos sistemas electroprodutores podem estar especialmente vulneráveis a alguns regimes em larga escala, tanto a nível da intensidade como da direcção dos ventos. Apesar da abrangência espacial dos padrões de correlação de cada modo, a análise do seu efeito numa área deverá ser feita tendo em conta as condições locais de cada região no que toca a fluxos/escoamentos frequentes, salientando a importância da topografia do local. O campo de variação de ventos resultante de um modo pode ser amplificado ou atenuado por condicionamentos topográficos ou fenómenos de mesoscala (ex: brisa marítima). Isso é evidente na Figura 16, representando simulações de um modelo.

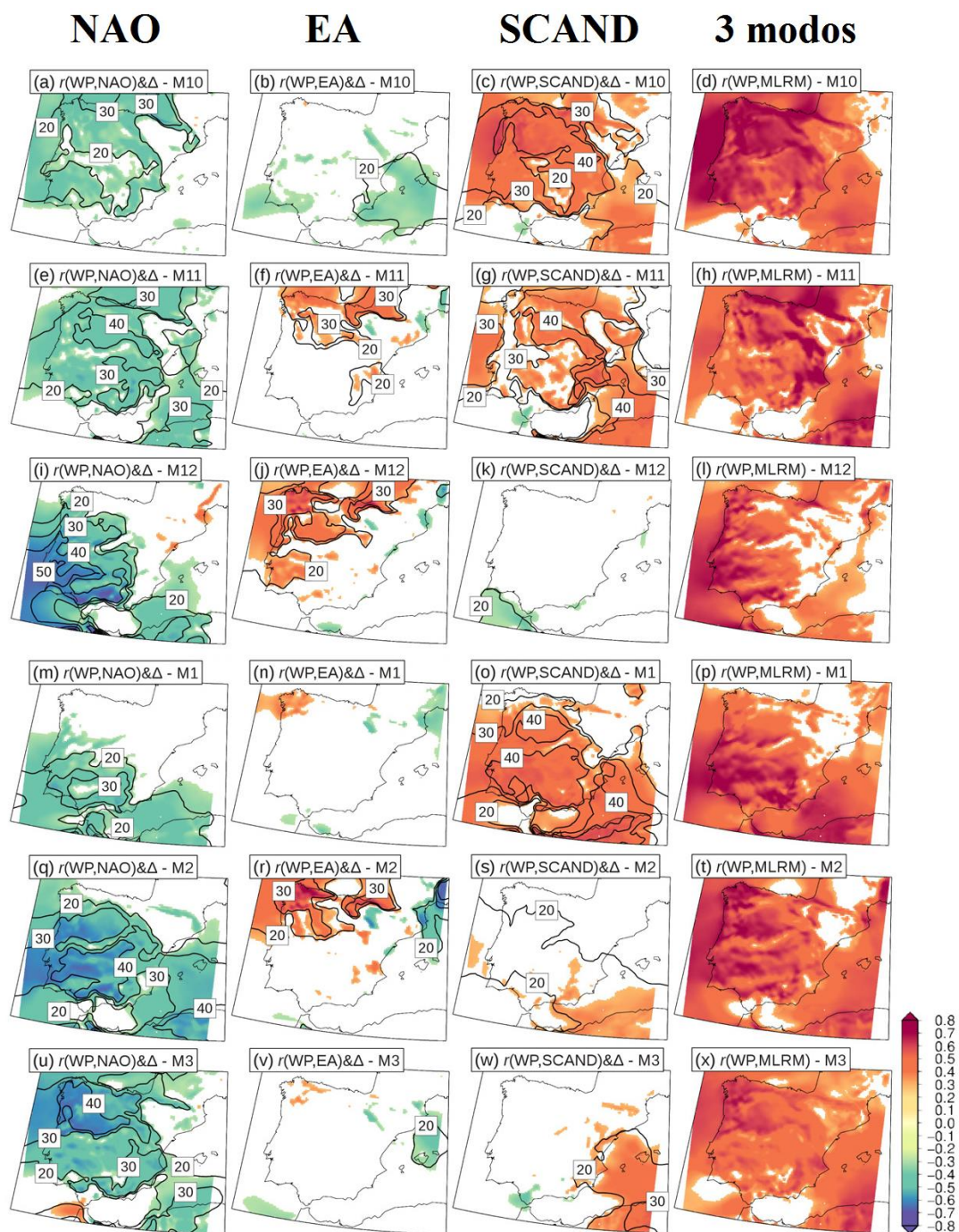


Figura 16: Correlações temporais (sombreamento colorido) entre a potência eólica e (da coluna esquerda para a direita) a NAO, EA, SCAND e potência eólica modelada com recurso aos 3 modos simultaneamente (MLRM). Os contornos, nas primeiras 3 colunas, indicam a diferença entre a potência média da fase positiva e negativa, para os vários índices (% em relação à climatologia da potência). As correlações foram calculadas numa escala mensal e encontram-se apresentadas, de cima para baixo na figura, de acordo com o mês do Inverno em análise (M10 – Outubro; M3 – Março). Retirado de (Jerez & Trigo, 2013)

Na Figura 16 também se denota alguma da variabilidade sazonal, entre Outubro e Março, do impacto dos modos (Jerez & Trigo., 2013). Os autores verificaram um aumento de 10-20 % da potência eólica, em relação à climatologia, associado à fase negativa da NAO, para a Península Ibérica e diferenças entre a fase positiva (menos energética na Ibéria) e fase negativa na ordem dos 25-40 %. Jerez et al. (2013) também encontrou uma correlação elevada e significativa entre o índice da NAO e a produção eólica, à escala interanual ($r = -0.73$). Este último exercício considerou apenas os dados de produção eólica espanhola, reais.

2. Metodologia

2.1 Localização das estações de recolha de dados

Os dados usados correspondem a 9 estações meteorológicas localizadas em Portugal continental, da rede do Instituto Português do Mar e da Atmosfera (IPMA). A localização com a latitude mais elevada é Bragança e a localização mais a Sul é Faro, estando todas as outras estações localizadas ao longo desta diferença latitudinal. Como se pode ver na Figura 19, no final da secção da metodologia, as estações estão relativamente espalhadas por Portugal, e em ambientes de relevo diferente – desde montanha a planície e litoral. As estações a altitudes (elevação a partir do nível médio do mar) mais elevadas correspondem também às estações localizadas mais afastadas do litoral (Bragança, Vila Real, Penhas Douradas, Portalegre e, em menor grau, Beja). As outras estações – Porto, Lisboa e Faro – estão a altitudes inferiores a 100 metros (Cernache, perto de Coimbra, está a cerca de 180 metros) e, como se pode verificar num mapa com a orografia de Portugal (também na Figura 19), menos influenciadas pelas várias formações montanhosas que caracterizam o interior montanhoso do Centro e Norte.

Como está apresentado na Tabela 1, as localizações estão ordenadas de Norte para Sul. Essa organização replica-se nas subseqüentes tabelas ou resultados (quando aplicável).

2.2 Tratamento dos dados

As medições dos anemómetros foram realizadas de hora a hora. Assim para cada dia temos 24 medições - aproximadamente 720 medições por mês; o que representa cerca de 8600 valores por ano; cerca de 113000 valores para todo o intervalo temporal considerado 2000-2012 (13 anos). As análises foram restritas ao Inverno de cada ano. Dado que o Inverno é uma estação presente na mudança de ano, adopta-se a seguinte caracterização comum na literatura: o Inverno de 2008, por exemplo, diz respeito aos meses de Novembro de 2007 a Março de 2008. O intervalo temporal em consideração pode variar, como se faz também neste estudo, mas, sempre que se considerar qualquer dos últimos meses do ano, esses meses consideram-se como fazendo parte do Inverno do ano seguinte, como exemplificado. Assim, por Inverno, temos cerca de 3600 medições (intervalo considerado para caracterização do Inverno: Novembro-Março). As medições têm resolução e abrangência temporal suficientes para poderem ser usados para caracterizar a variabilidade em vários domínios temporais, do ponto de vista do estado meteorológico médio associado a uma dada climatologia.

A restrição ao Inverno deve-se principalmente ao facto dos modos climáticos estudados terem uma maior expressão no Inverno. É também no Inverno prolongado que se verifica uma produção eólica superior, em comparação com o Verão prolongado.

No entanto, verificou-se que existem falhas na continuidade do registo de dados. Esse facto exigiu uma análise das falhas no registo, análise que permita a avaliar a cobertura temporal dos dados. Dois tipos de falhas no registo foram encontradas: as falhas relativamente curtas (pontuais ou intermitentes), em que falta apenas um ou poucos valores por mês; e as falhas mais alongadas, ou contínuas, que se estendam por um período de tempo suficientemente longo para que não se considere esse mês para a análise a efectuar. As falhas mais curtas são desprezáveis, embora se deva também proceder à sua contabilização.

Para o caso de haver falhas prolongadas no registo, adoptou-se um critério de exclusão simples: Se num dado mês mais de metade dos registos fossem inválidos, esse mês (e todos os valores horários nele incluído) são excluídos. Os meses incluídos nas análises após esse critério são contados, de modo a que se tem informações sobre o número de meses considerados para cada análise mais específica.

2. Metodologia

Tendo em conta a natureza da variabilidade de baixa-frequência dos modos, os dados horários foram agrupados mensalmente (mês) e todos esses registos associados à fase (dos modos NAO, EA e SCAND) activa nesse mês. Por exemplo, se se verificar uma fase negativa da NAO no mês de Dezembro de 2010, todos os registos desse mês desse ano são associados à fase negativa da NAO.

A Tabela 1 apresenta a lista das localizações, ordenadas por ordem decrescente de latitude. Para cada localização possui-se uma lista de registos das variáveis meteorológicas básicas, para um determinado intervalo de tempo, sendo que na tabela podemos ver a data a partir da qual se começa a análise (coluna 2) e a data onde termina a análise (coluna 3).

Para cada localização (e espaço temporal de análise) pode-se ver a percentagem de dados disponíveis – percentagem de cobertura de dados, tanto no que se refere às medições da intensidade e direção do vento. Os valores entre parêntesis são a percentagem de falhas pontuais, já após o critério de exclusão de meses.

As últimas duas colunas da tabela apresentam o número de meses considerados para análise relativa aos meses do Inverno extenso (Outubro até Março) e já após a exclusão de dados (intensidade & direção).

Localização (norte-sul)	Data (análise)	Data fim	Cobertura (Inverno) [%]		Nº meses considerados	
			Intensidade	Direção		
Bragança	1-Jan-2000	31-Dez-2012	98.25 (1.78)	86.17 (1.74)	65	57
Vila Real	1- Jan -2001	31-Dez-2012	99.90 (0.10)	99.77 (0.24)	60	60
Porto	1-Jan-2000	31-Dez-2012	95.39 (1.51)	83.08 (1.73)	63	55
Penhas Douradas	1-Jan-2001	31-Dez-2012	92.51 (2.66)	82.59 (2.89)	57	51
Cernache (Coimbra)	1-Jan-2000	31-Dez-2012	96.42 (2.14)	79.53 (0.61)	64	52
Portalegre	1-Jan-2000	31-Dez-2012	99.66 (0.34)	79.69 (0.41)	65	52
Lisboa	1-Jan-2000	31-Dez-2012	96.27 (0.65)	91.30 (1.05)	63	60
Beja	1-Jan-2000	31-Dez-2012	99.59 (0.41)	79.81 (0.26)	65	52
Faro	1-Jan-2000	31-Dez-2012	99.06 (0.95)	79.05 (1.21)	65	52

Tabela 1: Localização geral das estações de recolha dos dados usados; período temporal dos dados, assim como o usado para a análise; percentagem de cobertura para a intensidade e direção assim como a percentagem de dados inexistentes nos períodos de dados usados, entre parêntesis; na última coluna, o número de meses considerados.

2.3 Índices dos modos climáticos

Os dados referentes aos modos climáticos foram retirados do sítio do CPC, para os mesmos períodos temporais dos dados do vento, mas com uma resolução mensal – um valor de índice (por cada modo) para cada mês. Os índices foram calculados com recurso a uma análise PCA ao campo da altura geopotencial 500 mb. Uma discussão detalhada está disponível no sítio do CPC.

A identificação das diferentes fases de cada modo é feita com base no valor dos seus índices:

Fase positiva: Índice ≥ 0.5 ;

Fase intermédia ou neutra: $-0.5 \leq \text{índice} \leq 0.5$;

Fase negativa: Índice ≤ -0.5 ;

Os índices dos 3 modos foram normalizados (subtraído o valor médio, divisão pelo desvio-padrão). A Figura 17 contém os índices dos modos (mensal) entre início de 2000 e final de 2012, sendo considerados 5 meses do Inverno (Outubro até Março). As linhas horizontais a tracejado indicam o valor do índice (0.5 ou -0.5) a partir do qual se considera o modo como estando na fase positiva ou negativa, sendo que todos os valores entre as linhas a tracejado são agrupados na fase intermédia ou neutra.

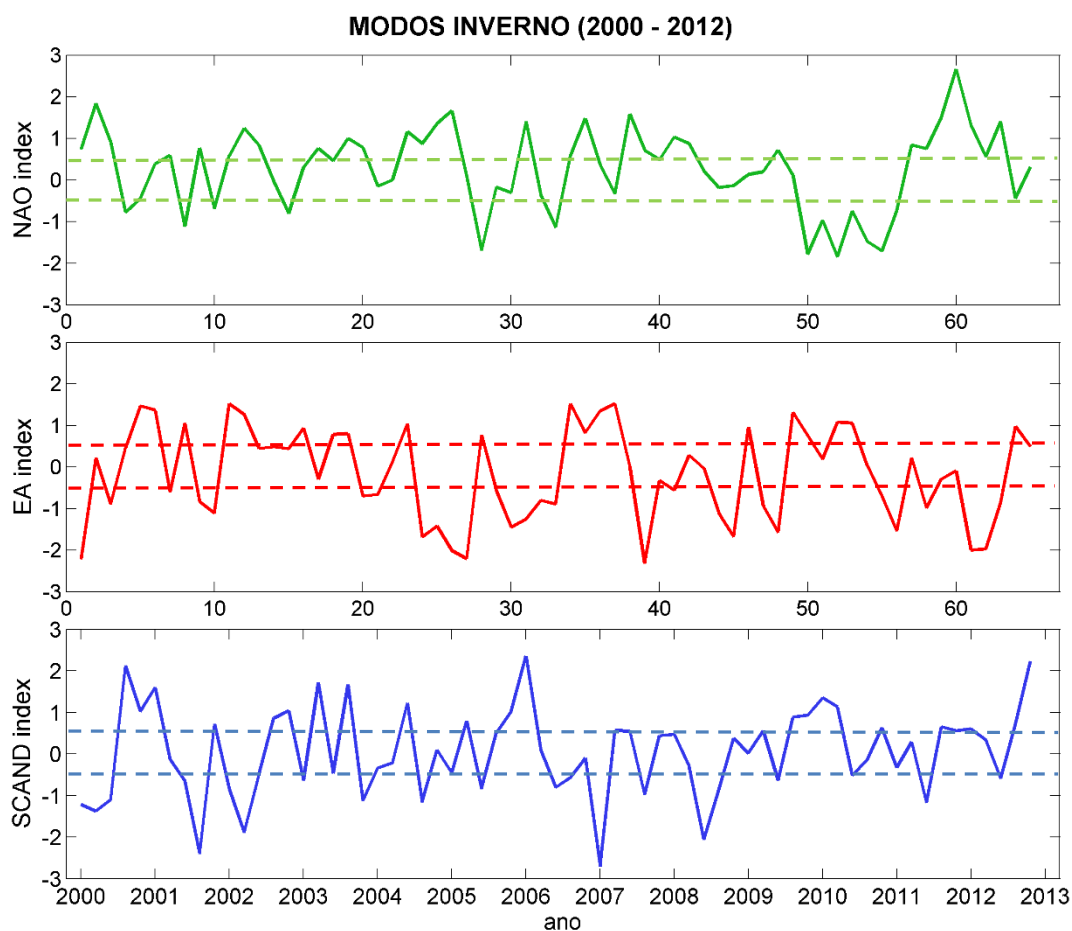


Figura 17: Índices mensais dos 3 modos climáticos para o período 2000-2012. Considera-se apenas o Inverno, caracterizado pelos meses entre Outubro e Março. As linhas a tracejado dividem as fases positivas e negativas da fase neutra. Adaptado de (CPC NOAA).

2. Metodologia

A Tabela 2 contém o número de ocorrência para cada fase relativa a cada um dos modos em análise, durante os períodos de Inverno (de Novembro a Março). Entre parêntesis está a frequência de ocorrência de cada fase sendo que 100 % corresponde à soma da frequência de todas as fases de um modo, ou seja, todos os meses de Inverno de 2000-2012. Esta informação é importante para perceber a frequência relativa das fases dos modos. A fase intermédia não ultrapassa um terço das ocorrências.

	Fase negativa (-)	Fase intermédia	Fase positiva (+)	
NAO	13 (20 %)	22 (34 %)	30 (46 %)	
EA	28 (43 %)	17 (26 %)	20 (31 %)	65 (100 %)
SCAND	21 (32 %)	18 (28 %)	26 (40 %)	

Tabela 2: Número de ocorrências de cada fase de cada modo. Expresso em meses e percentagem do total. Período 2000-2012

Como mencionado na introdução, é de interesse não só estudar o efeito individual de cada fase de cada modo climático como também o efeito das suas combinações. Restringiu-se a análise às fases positivas e negativas (excluí-se as fases intermédias) e a combinações dois a dois. Isso resulta, para os 3 modos em estudo, em 12 combinações possíveis, como se pode ver na Tabela 3.

Combinação de modos	N.º de meses	Frequência [%]	Total
NAO e EA	(NAO ⁻ EA ⁻) ^S	4	13 %
	(NAO ⁻ EA ⁺) ^O	5	16 %
	(NAO ⁺ EA ⁻) ^O	16	52 %
	(NAO ⁺ EA ⁺) ^S	6	19 %
NAO e SCAND	(NAO ⁻ SCAND ⁻) ^S	4	12 %
	(NAO ⁻ SCAND ⁺) ^O	7	22 %
	(NAO ⁺ SCAND ⁻) ^O	13	41 %
	(NAO ⁺ SCAND ⁺) ^S	8	25 %
EA e SCAND	(EA ⁻ SCAND ⁻) ^S	11	31 %
	(EA ⁻ SCAND ⁺) ^O	8	22 %
	(EA ⁺ SCAND ⁻) ^O	8	22 %
	(EA ⁺ e SCAND ⁺) ^S	9	25 %

Tabela 3: Combinações de modos estudadas. Na segunda coluna estão indicadas que fases são combinadas, estando também indicado se a combinação é entre fases iguais ou opostas. Na terceira coluna está indicada a frequência média de cada combinação para o período 2000 – 2012. Essa frequência é calculada em relação a uma particular combinação de modos, como se pode ver pela quarta coluna.

2.4 Caracterização do estado médio das variáveis de acordo com os modos climáticos (e sua fase ou combinação de fases)

Após a aplicação dos critérios de exclusão, toda a base de dados de registos encontra-se em condições de fornecer informação estatística sobre o estado atmosférico médio de cada fase para cada modo, assim relativo às possíveis combinações. Assim, para cada fase de cada modo, construíram-se histogramas de frequências da intensidade do vento; potência média; e histogramas angulares de frequência da direção do vento. As mesmas figuras foram produzidos para a situação média de um local para o Inverno (a climatologia), que corresponde a usar-se todos os meses de Inverno como período de análise, para se poder ter uma situação de referência em relação à variabilidade induzida pelos diferentes modos. Para cada fase procede-se à contagem de meses usados (a amostra), de modo a avaliar a sua representatividade.

Além da obtenção das figuras calcularam-se também os valores médios associados a cada estado, o que permite comparações (em unidades da variável e também em percentagem) relativamente à climatologia. Por exemplo, um local com média climatológica de potência de 200 kW e uma potência média de 250 kW associada a uma certa fase de um modo climático verifica um aumento de 50 kW de potência associado esse estado atmosférico. Percentualmente, este caso representa um incremento de 25 %, de acordo com a Equação 1:

$$\text{Variação de potência [\%]} = \frac{\text{Potência}(\text{modo}^{\text{fase}}) \times 100}{\text{Potência}(\text{Climatologia})} - 100 \quad (1)$$

Da mesma maneira, se a potência associada a um estado for menor que a potência da climatologia, as equações de cima dão-nos valores negativos, o que indica decréscimo de potência.

Desta maneira construíram-se tabelas com a potência média associada a cada fase de cada modo e para as 12 combinações mencionadas anteriormente (ou seja, cada estado); e com a percentagem que essa variação verifica em função da climatologia (a potência média de toda amostra temporal). Com a informação relativa podemos comparar o impacto entre os diferentes locais.

2.5 Correlações com as médias temporais das variáveis

Para se estudar relações entre o comportamento das demais variáveis disponíveis (SLP, intensidade do vento, direção e potência) e os índices dos vários modos climáticos considerados, calculam-se médias para o período mensal e anual das variáveis.

Nas **médias mensais**, cada mês de cada Inverno vai ser caracterizado por um valor que é a média de todos os registos horários desse mês. Assim, para cada localização mencionada possuímos um vector, cujo tamanho é o número de meses totais considerados, que retrata a variação de cada variável ao longo do tempo (mês a mês), para os Invernos. Tal como nas secções anteriores, os Invernos são sempre relativos aos meses de Novembro a Março.

Nas **médias anuais**, cada ano (Inverno) é caracterizado por um valor que representa a média de todos os registos horários desse conjunto de meses. Neste caso, experimentam-se diferentes combinações de meses como identificativas do Inverno, sendo a variabilidade estudada a variabilidade interanual.

Para se poder comparar as séries temporais das diferentes variáveis com as séries correspondentes aos índices dos modos é necessário proceder à sua normalização. É conveniente exprimir a informação do comportamento das variáveis na forma de anomalias padronizadas (também chamadas de anomalias normalizadas). As anomalias padronizadas são criadas pela subtração da climatologia (média, \bar{X}) em

todos os pontos do vector temporal de uma variável ($X_{1:t}$), seguido da divisão pelo seu desvio-padrão (σ).

$$X_{\text{norm}}(t) = \frac{X(t) - \bar{X}}{\sigma(X)} \quad (2)$$

A normalização dos dados permite compreender melhor a magnitude das anomalias presentes e desta forma distinguir mais facilmente valores normais de valores menos comuns das variáveis em estudo. Isto é possível porque a normalização corresponde a uma adimensionalização dos dados, representando a oscilação natural da série à volta da média (= 0) e o seu desvio-padrão em -1 e 1.

As correlações foram calculadas com o coeficiente de correlação de Pearson, para vários graus de significância ($p < 0.01$; $p < 0.05$ e $p < 0.1$). Correlações significativas ao nível dos 99 % estão a **negrito**; 95% a *itálico*; e 90 % sublinhadas. Estas correlações temporais são interpretadas como medidas do grau de relação linear entre duas variáveis, e os valores possíveis situam-se entre 1 e -1. Quanto mais perto o coeficiente de correlação estiver de 1 (ou -1: correlação inversa), mais forte é a relação entre as variáveis. Quanto mais perto de 0 estiver o coeficiente, menor a probabilidade de haver uma relação linear entre as variáveis. O valor desta metodologia pode ser aumentado se testarem também relações com outros coeficientes de correlação. O coeficiente de Pearson é sensível à presença de valores *outliers*, razão porque também se complementa com a aplicação do coeficiente de Spearman (sítio do Statistics Solution).

2.6 Modelos de Regressão Linear (MLRM)

Os modos de variabilidade climática, apesar de possuírem centros de acção geograficamente distintos, têm impactos na estrutura atmosférica de vastas regiões, havendo assim a possibilidade de diferentes modos terem influência simultânea numa mesma região. No contexto da construção de modelos de diagnóstico, os índices de cada modo são considerados variáveis preditoras. A inclusão de mais do que uma variável preditora para explicar o comportamento do clima permite estudar o efeito combinado dos modos. Este exercício já foi aplicado em trabalhos recentes (Jerez & Trigo, 2013), através de uma regressão linear múltipla, como é apresentado na Equação 3.

$$X(t) = C_0 + C_N \text{WNAO}(t) + C_{EA} \text{WEA}(t) + C_S \text{WSCAND}(t) \quad (3)$$

Na Equação 3, os coeficientes WNAO, WEA e WSCAND representam as variáveis preditoras (índices Inverno), e são acompanhadas de cada um dos coeficientes de regressão, C_N , C_{EA} , e C_S , além de C_0 , que é uma constante. Após a obtenção de uma série modelada, esta é comparada com a série observada (variáveis meteorológicas, dependentes) através de dois coeficientes de correlação (Pearson e Spearman). Esta metodologia foi aplicada à intensidade do vento e à potência, expondo-se neste trabalho somente os resultados da potência. Isto porque o estudo da potência é de maior relevância, e verificam-se diferenças mínimas entre os resultados para a potência e os para a intensidade, na maior parte das localizações.

Esta metodologia também foi aplicada aos dados de energia eólica produzida mensalmente em Portugal, dos quais se falará posteriormente, e constituem a segunda abordagem ao estudo dos modos climáticos.

2.7 Curva de potência do aerogerador

A potência é submetida ao tratamento que se referiu nos pontos anteriores. No entanto, esta tem que ser calculada a partir da intensidade do vento com os dados disponíveis para o efeito.

Para se aproximar do que corresponde à realidade de produção eólica, usou-se como referência para o cálculo da potência a curva de potência de um aerogerador representativo da tecnologia eólica existente e instalada. Uma curva de potência indica a potência de funcionamento em função da intensidade do vento, como se pode observar na Figura 18. O aerogerador escolhido para esta modelação simplificada é da companhia Vestas: V90-3.0 MW (informação no sítio da Vestas)

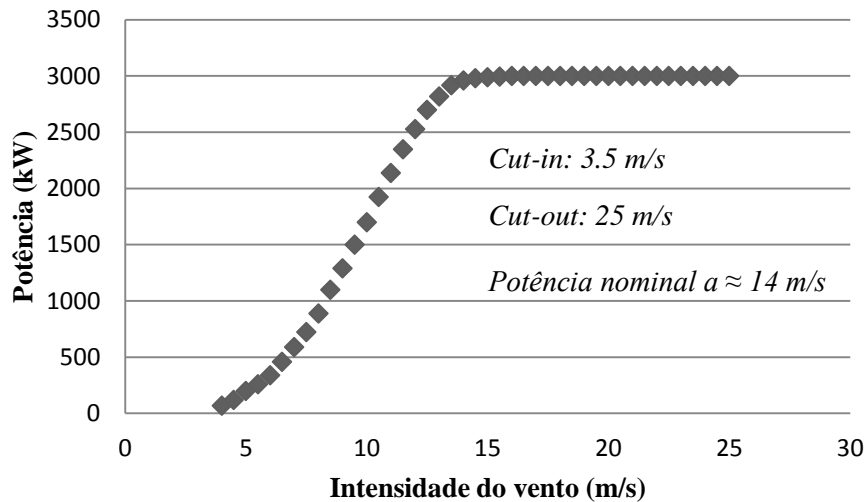


Figura 18: Curva de potência do aerogerador Vestas V90 – 3.0 MW.

Para este estudo, as características de desempenho mais relevantes são a velocidade de arranque (*Cut-in speed*), velocidade de corte (*Cut-out speed*) e a Potência Nominal do aerogerador. Essa informação pode ser retirada da curva de potência. No entanto, a curva de potência disponível não possui um grau de detalhe adequado, pois os valores de potência por intensidade de vento foram retirados visualmente com uma resolução de 0.5 m/s (metade do intervalo mínimo na figura da curva de potência obtida para o gerador Vestas). Apesar de essa resolução ser suficiente para reter o comportamento da potência face à intensidade dos ventos, não é suficiente para um cálculo rigoroso (pois o máximo que permitiria era o estabelecimento de escalões de potência, em função dos escalões de intensidade de vento). Para aliviar este problema, foi necessária a obtenção de uma equação para a curva de potência a partir dos dados retirados, que na sua essência é uma linha de regressão polinomial (quarto grau). Executou-se esta metodologia apenas para os valores de intensidade de vento entre 3.5 m/s e 14 m/s. A partir de 14 m/s a potência é praticamente a potência nominal, e a partir dos 16 m/s, a potência estabiliza no valor de potência nominal da turbina. A correlação entre a curva de potência construída visualmente e a regressão polinomial é de 0.99. A função criada, que inclui a equação construída, executa para os seguintes escalões de velocidades (SPD):

[0 – 3.5[m/s: $P_{\text{aerogerador}} = 0$

[3.5 – 14] m/s:

$$P_{\text{aerogerador}}[\text{kW}] = (-0.5104 \times \text{SPD}^4) + (13.628 \times \text{SPD}^3) - (97.853 \times \text{SPD}^2) + (344.9 \times \text{SPD}) - 480.05$$

[14 – 16[m/s: $P_{\text{aerogerador}} = 2995 \text{ kW}$ (99.8 % da potência nominal)

[16 – 25[m/s: $P_{\text{aerogerador}} = 3000 \text{ kW} = 3 \text{ MW}$ (potência nominal)

(valores referência: para 3.5 m/s $\approx 36.11 \text{ kW}$; para 4 m/s $\approx 75.43 \text{ kW}$)

Esta conversão de intensidade de vento em potência foi feita para todos os dados horários.

2.8 Energia produzida (eólica Portugal)

Para se averiguar uma possível relação entre os índices dos diferentes modos climáticos e a produção eólica nacional, obtiveram-se os dados mensais de energia eólica injectada na rede eléctrica nacional pela totalidade dos parques eólicos nacionais de Portugal Continental, para o período de 2008 – 2014. Esta informação foi obtida através do sítio do centro de informação da REN, que providencia estatísticas diárias e mensais, entre outras informações técnicas, sobre o sistema electroprodutor nacional, incluindo rede de transporte. A relação entre os modos e a potência eólica pode ser validada por esta base de dados de produção real de energia eólica.

A energia eólica efectivamente produzida e injectada na rede poderia não ser equivalente à energia eólica produzida, devido à intervenção de fatores de várias naturezas (técnica, económica, legislativa, segurança de rede,...). Se isso fosse o caso seria difícil ou impossível avaliar o impacto dos modos climáticos na produção eólica. No entanto, a energia eólica produzida tem prioridade em relação à energia de outras fontes energéticas, no que toca à sua injeção na rede, o que indica que sempre que houver energia eólica a ser produzida, ela é injectada na rede primeiro que a energia de outras fontes (Miranda, 2011). Assim, é mantida a relação entre a energia eólica injectada na rede e a energia eólica efectivamente produzida, tornando este exercício viável.

O estudo da relação entre os modos climáticos e a energia eólica produzida é realizada para o Inverno (Invernos 2008-2014) considerando-se diferentes grupos de meses para caracterização dessa estação. Considerando intervalos mais abrangentes (Inverno é o intervalo de Outubro a Março - 6 meses) ou intervalos mais curtos (Inverno é o intervalo de Dezembro a Fevereiro - 3 meses). Intervalos usados para caracterizar os Invernos neste exercício:

- NDJFM: amostra de 35 meses (intervalo usado na análise anterior)
- ONDJF: amostra de 35 meses
- DJF (3 meses): amostra de 21 meses

Obviamente existe a possibilidade de os resultados variarem consoante o intervalo de meses considerados para representar o Inverno de cada ano.

Como referido, os valores de energia eólica produzida (obtidos da REN) são mensais, o que oferece a possibilidade de uma comparação directa com os índices mensais dos modos. No entanto, a capacidade eólica nacional instalada varia com o tempo. Houve, ao longo do período em análise, a instalação de novas turbinas ou novos parques o que leva a uma situação de aumento de potência instalada com o tempo; ou o fim de funcionamento de alguns aerogeradores, o que levaria a uma situação de diminuição de potência instalada. Os aumentos de potência nacional ao longo do período em análise são incomparavelmente superiores às diminuições de potência, o que leva a uma situação de crescimento da potência instalada em Portugal. Desta forma, se análises da energia produzida a nível nacional não tomarem em conta esse crescimento de potência, não são representativas da variabilidade a que está sujeito o recurso eólico. Assim, para se poder analisar a variabilidade da produção eólica, tem que se normalizar a energia produzida em função da capacidade instalada. Isto é feito dividindo a energia produzida em cada mês pela potência instalada nesse mês, idealmente, tal como feito em Jerez et al. (2013).

No entanto, devido à ausência de dados temporalmente mais pormenorizados em relação à evolução mensal da potência instalada (e especialmente quando é que começa a haver injeção na rede), fez-se o exercício adoptando as seguintes aproximações. Os dados obtidos são a potência eólica instalada até ao final do ano (Tabela 4). Conveniente para esta aproximação, o facto de esta análise se restringir ao Inverno sugere que se pode assumir que normalizar a energia produzida mensalmente nos meses de Outubro a Março com a potência instalada até ao final de Dezembro produz o menor erro (para a disponibilidade de dados existentes). Para o intervalo mais largo de análise (Outubro-Março), o único valor disponível de potência instalada nesse intervalo situa-se temporalmente no centro do intervalo a considerar – o que deflaciona a quantidade de energia produzida (normalizada) nos meses iniciais do Inverno (Outubro e Novembro) e inflaciona a quantidade de energia produzida (normalizada) nos

meses finais do Inverno (Janeiro/Fevereiro – Março). Por esta lógica, para intervalos menos largos, o erro deste processo de normalização é menor.

Após a normalização da energia produzida com recurso à potência instalada (nominal), a energia fica expressa em horas de funcionamento à potência nominal (por mês). Também se pode exprimir a energia produzida em percentagem de incremento (ou decréscimo) em relação à climatologia.

A semelhança da metodologia descrita na secção 2.5, este exercício é também feito executando-se médias anuais dos valores de energia produzida de modo a que se fique com apenas um valor de energia normalizada por Inverno.

Todas as correlações estudadas foram testadas quanto à sua significância.

Tabela 4: Capacidade eólica instalada em Portugal Continental (no final de cada ano) e crescimento percentual de ano para ano.

Portugal Continental	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
Capacidade instalada [MW]	2446	3037	3519	3865	4309	4464	4653
Crescimento [%]	-	24.16	15.87	9.83	11.49	3.60	4.23

Na página 35 está a Figura 19 (referida mas não apresentada antes). Essa figura, retirada do Relatório anual Energias Endógenas de Portugal da Associação Portuguesa das Energias Renováveis, contém as localização dos parques eólicos de Portugal Continental, discriminados com cores diferentes de acordo com a capacidade de cada parque. Os dados dos parques eólicos (localização, potência e capacidade do distrito em que inserem) são relativos ao final de 2013. Nessa Figura, o mapa da esquerda contém, além da localização das 9 estações de recolha de dados (quadrado preto com centro branco), informações sobre a altimetria nacional, através das cores de fundo. O mapa da direita também contém, além de informação sobre a altimetria, a capacidade eólica instalada por distrito, em MW.

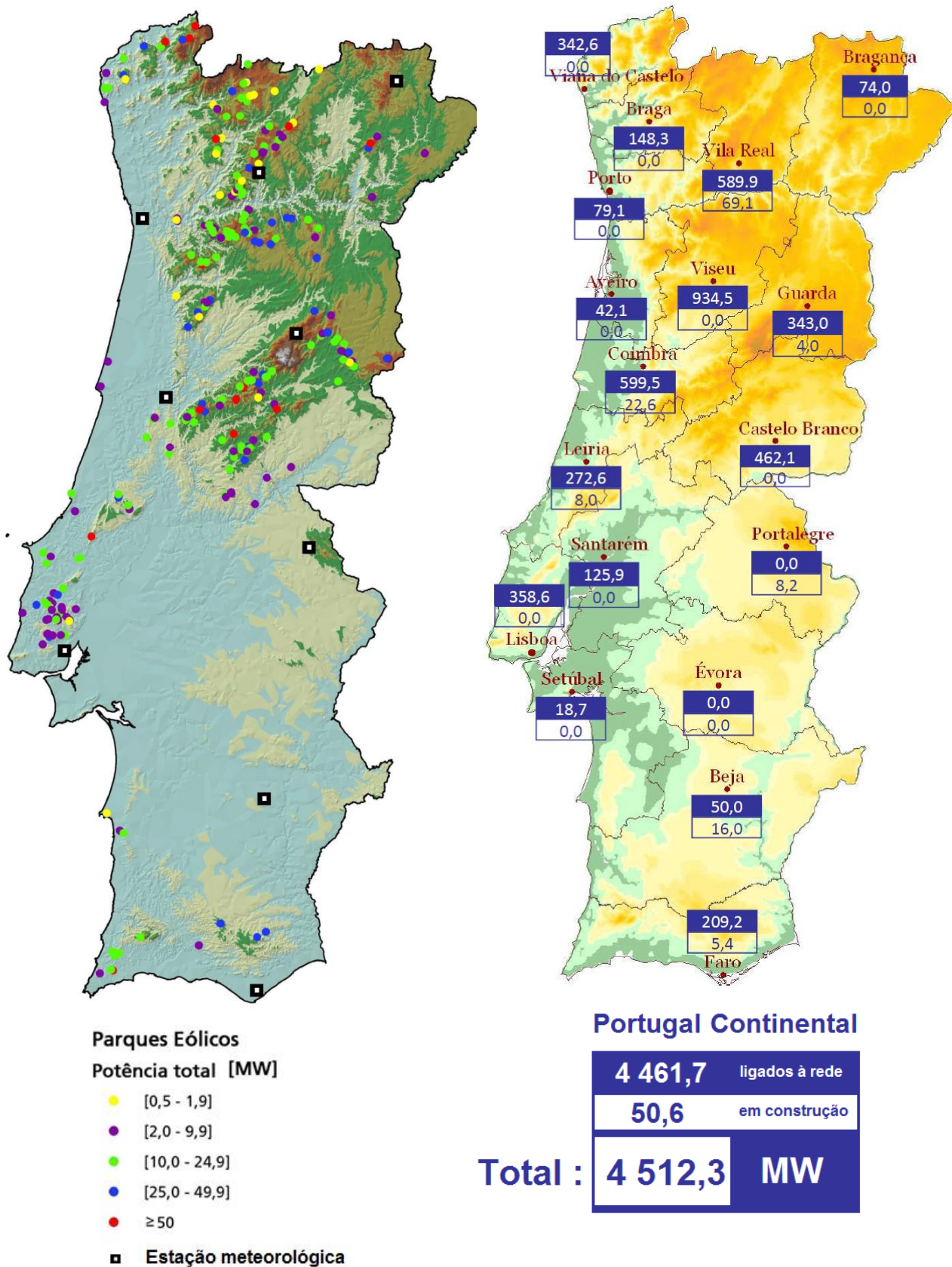


Figura 19: A imagem da esquerda indica a localização dos Parques Eólicos em Portugal Continental (círculos coloridos), a sua capacidade (consoante a cor) e a localização das 9 estações para o qual se possuem dados (quadrado preto com centro branco). A imagem da direita indica o valor de capacidade eólica instalada, ou em construção, por distrito. Ambas as imagens representam informação à data de final de 2013 e contêm informação altimétrica de Portugal (padrões de cores na superfície). Retirado e adaptado de Energias Endógenas de Portugal, do seu relatório anual sobre Parques Eólicos em Portugal

3. Resultados e Discussão

A exposição de todos os resultados está limitada pela extensão do trabalho. Assim, para não apresentar todos os resultados relativos a todas as estações utilizadas, a análise será focada em algumas secções nos resultados obtidos para as estações de Cernache (distrito de Coimbra) e Penhas Douradas (distrito da Guarda). A escolha destas duas estações representativas deve-se a corresponderem a estações localizadas relativamente perto da regiões com uma significativa capacidade eólica instalada e, por outro lado, onde se verificam a existência de relações entre os modos de variabilidade climática e a potência e direção dos ventos. Além dessas estações, a estação de Vila Real também está numa região com alguma capacidade eólica instalada e, à semelhança de Penhas Douradas, está inserida num local montanhoso, pelo que também serão apresentados alguns resultados referentes a esta estação.

3.1 Climatologia para as localidades com as estações meteorológicas

Na Tabela 5 é apresentada a climatologia relativa à intensidade dos ventos e potência. Também se apresenta informação acerca da altitude dos locais onde se situam as estações de recolha de dados e informação acerca dos extremos de vento verificados.

Tabela 5: Climatologia (média e desvio-padrão) da intensidade do vento e potência média de cada estação. A negrito estão realçadas as estações para o qual se apresentam mais resultados, posteriormente. Adicionalmente, são apresentados os valores extremos de intensidade de vento, assim como a altitude aproximada dos locais onde se situam as estações de registo.

Estação	Altitude [m]	Velocidade [m/s]			Potência [kW]	
		\bar{X}	σ	Extremos	\bar{X}	σ
Bragança	674	2.13	1.91	16.6	58.60	198
Vila Real	425	1.78	1.45	14.5	25.9	119
Porto	85	3.46	1.95	17.4	126.40	282
Penhas Douradas	1300	5.56	3.97	28.5	605.52	889
Cernache (Coimbra)	179 (25 - 200)	2.50	1.70	13.9	57.70	183
Portalegre	450 (400 - 600)	3.57	2.15	16.9	152.68	317
Lisboa	50	3.33	1.94	13.9	114.09	249
Beja	260	3.28	1.81	16.4	102.60	250
Faro	82	3.67	2.45	18.1	197.00	421

Inicialmente verificou-se a capacidade do distrito em que cada estação se localiza e de que maneira está distribuída a potência eólica nesse distrito – Figura 19. De uma perspectiva de proximidade e agrupamento, há duas grandes áreas de produção eólica em Portugal, onde está instalada a maioria da potência eólica continental. A área no Centro-Norte, que contém os distritos de Coimbra, Guarda e Castelo Branco; e a área no Norte que contém grande parte da capacidade dos distritos de Vila Real, Viseu e Porto. As estações de Vila Real, Porto, Penhas Douradas e Cernache (Coimbra) são as estações que estão inseridas ou mais próximas das zonas de geração. No entanto, isso não implica necessariamente que sejam representativas do distrito ou zonas de geração, uma vez que a orografia dos locais, pode criar obstáculos à circulação atmosférica e outras situações de micro clima e tipo de rugosidade (Simões, 2004).

Como se pode ver pelas climatologias da Tabela 5, nenhum dos locais atinge o patamar de intensidades de vento médias de 6 m/s, valor indicado pela Associação Portuguesa das Energias Renováveis, a partir do qual se considera a instalação de um parque eólico. Em Portugal, essas condições encontram-se

tipicamente em zonas montanhosas e junto ao litoral. Penhas Douradas, no entanto, verifica uma intensidade de vento média próxima desse valor de referência.

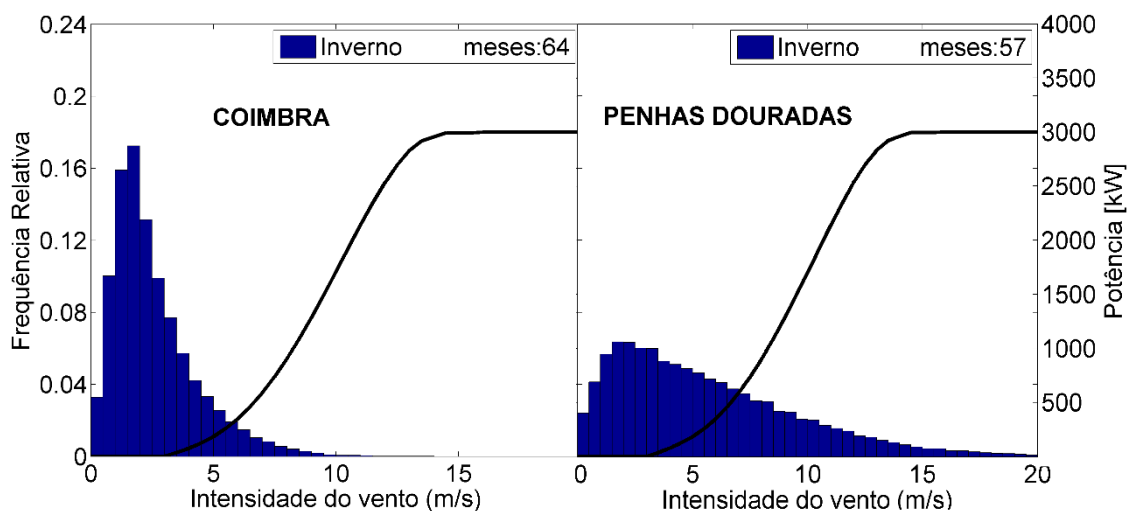


Figura 20: Histogramas da intensidade do vento para Coimbra e Penhas Douradas. Sobreposto em ambos os histogramas está a curva de potência do aerogerador modelo.

Os histogramas da intensidade de vento referentes a Coimbra e Penhas Douradas - para a climatologia (Inverno) - são apresentados na Figura 20, juntamente com a curva de potência de um aerogerador sobreposta (mesmo eixo das abcissas, eixo das ordenadas na direita). Como se pode verificar, o posicionamento da distribuição relativo à curva de potência é de grande importância pois na parte de crescimento abrupto da curva de potência do aerogerador, a variância associadas às anomalias de intensidade de vento traduzem-se em variações grandes de potência.

O facto de que este aerogerador (potência nominal na ordem 3 MW) só começar a produzir energia a partir de intensidades de vento de 3.5 m/s (≈ 36 kW) indica que localizações cuja intensidade média do vento é menor que 3.5 m/s estão sujeitas a não produzirem energia a maior parte do tempo, como se pode ver pela Figura 21.

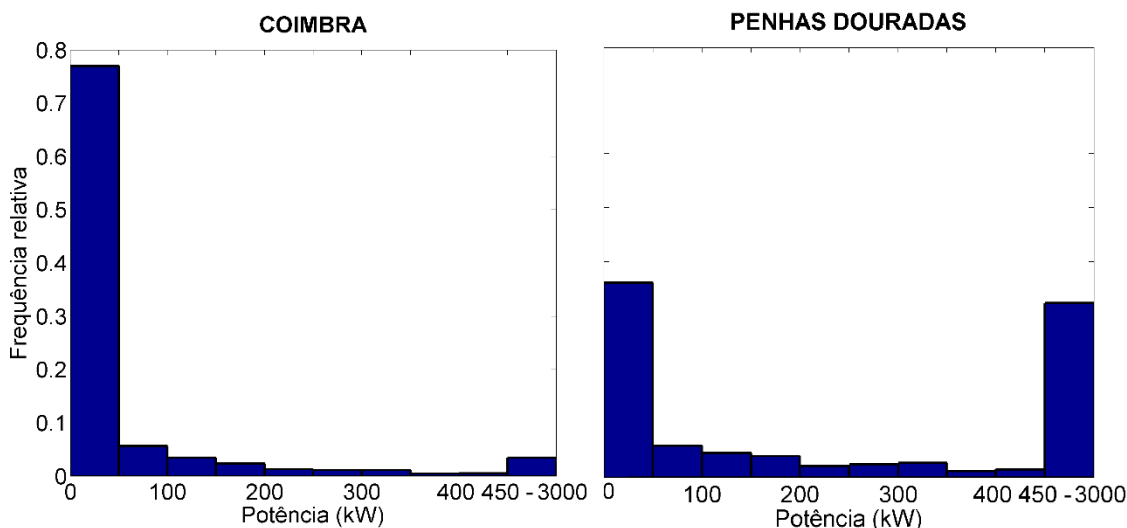


Figura 21: Histogramas de potência para Coimbra (esquerda) e Penhas Douradas (direita) – Período: Invernos 2000-2012. Estes histogramas representam a climatologia da potência de cada um dos locais. O último escalão de potência engloba a frequência de todas as potências até à nominal – [450 – 3000] kW

No entanto, devido ao primeiro escalão nos histogramas de potência na Figura 21 conter valores de potência diferente de zero, nomeadamente para os valores de intensidades de vento 3.5 m/s e 3.6 m/s calcula-se o fator de capacidade tal como indicado na Equação 4.

$$f_c [\%] = \frac{\overline{\text{Potência mensal}}}{\text{Potência Nominal}} \times 100 \quad (4)$$

A velocidade média da estação Coimbra, 2.5 m/s, situa-se abaixo da velocidade de arranque do aerogerador, indicando neste caso que cerca de 70 % do tempo não está a produzir. Já em Penhas Douradas, a velocidade média de 5.56 m/s (cerca de 2 m/s superior à velocidade de arranque do aerogerador) explica um fator de capacidade maior. A diferença entre Coimbra e Penhas Douradas é evidente, quando se comparam a última barra de cada histograma da Figura 21, que representa a frequência acumulada de todos os escalões seguintes até à potência nominal de 3000 kW.

Em 2013, em parques eólicos em vários países europeus (incluindo Portugal) foram registados valores de fatores de capacidade na gama dos 20 – 30 % (Boccard, 2009). Nos últimos trimestres de 2012 e 2013, o fator de capacidade em Portugal foi cerca de 30 %, igual à media Europeia no mesmo período, mas inferior aos valores atingidos pelos parques eólicos nos EUA e Brasil, na ordem dos 35 – 40 % (Relatório de Dados Operacionais Previsionais da EDP). Os fatores de capacidade dos locais deste estudo apresentam valores muito mais baixos (excetuando na estação de Penhas Douradas) do que os fatores de capacidade médios dos parques eólicos instalados em Portugal (Tabela 6). Esta discrepância traduz dois aspetos significativos: por um lado, as estações meteorológicas encontram-se localizadas usualmente em locais não otimizados do ponto de vista da produção de energia eólica, uma vez que a sua finalidade primordial é o de fornecer informação meteorológica de qualidade perto de zonas urbanas ou indicativa de zonas rurais mal monitorizadas; por outro lado, esta diferença também traduz a busca de zonas mais eficientes do ponto de vista da produção de energia eólica.

Tabela 6: Fator de capacidade para cada estação.

Local	Fator de capacidade [%]
Bragança	2
Vila Real	0.9
Porto	4
Penhas Douradas	20
Cernache (Coimbra)	2
Portalegre	5
Lisboa	4
Beja	3
Faro	7

3.2 Impacto dos modos de variabilidade climática na intensidade dos ventos e potência eólica

O estudo da interação entre os 3 modos de variabilidade climática e variáveis importantes para a produção eólica será analisada nesta secção do trabalho, começando pela intensidade do vento.

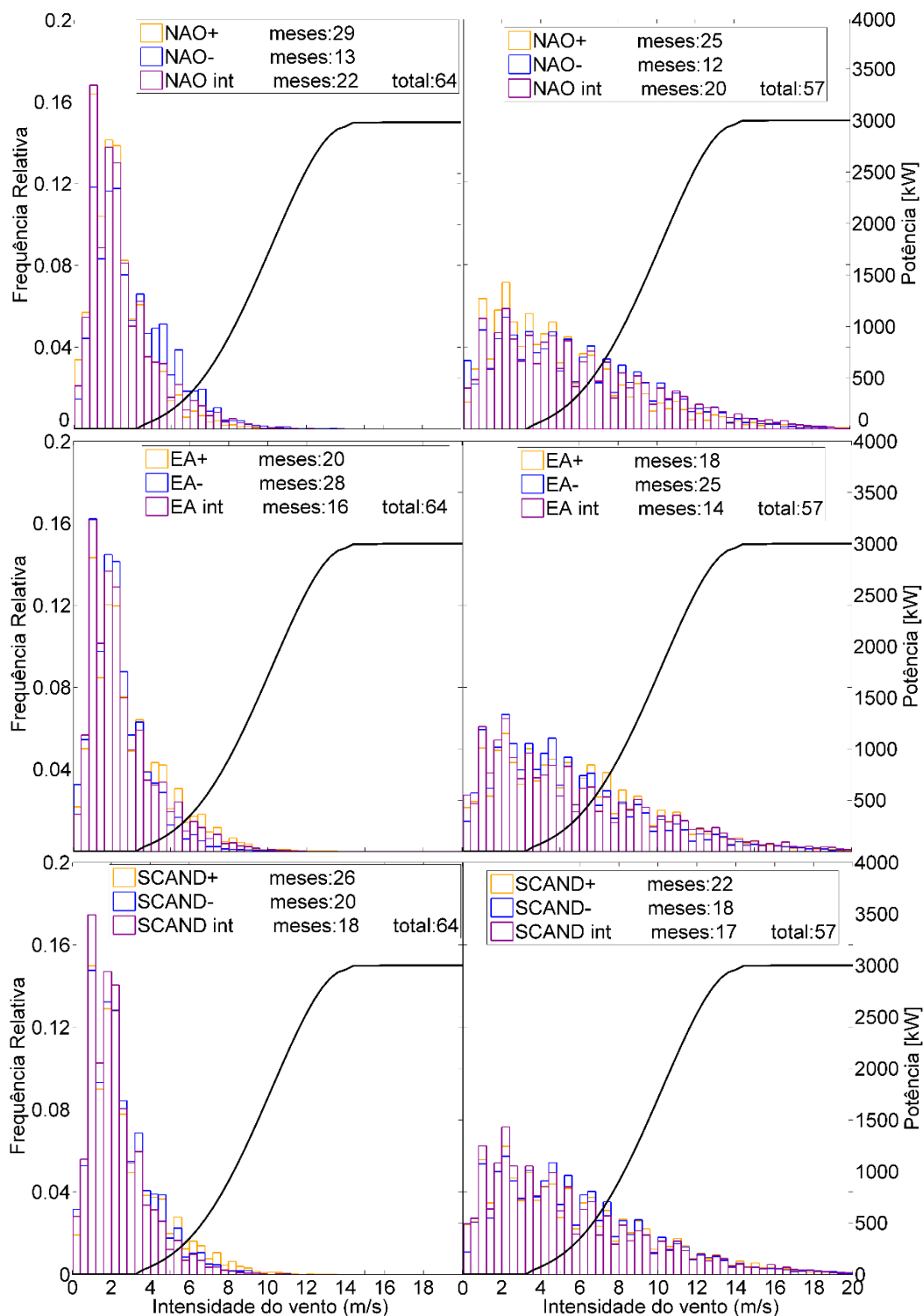


Figura 22: Histogramas de frequência da intensidade do vento para Coimbra (coluna esquerda) e Penhas Douradas (coluna direita), por cada fase de cada modo. Os gráficos estão divididos por modos (1º NAO 2º EA 3º SCAND). Os histogramas, em cada gráfico, estão divididos por fase do modo, indicado por diferentes cores.

Na Figura 22 representam-se histogramas da intensidade de vento para Coimbra (intensidade do vento média 2.5 m/s) e Penhas Douradas (5.56 m/s). Dentro de cada gráfico pode-se observar uma distribuição diferente associada a cada fase do modo em análise. Como se discute em mais detalhe de seguida, existem diferenças significativas nas médias da intensidade associadas às diferentes fases. Nos histogramas da Figura 22, especialmente para os modos NAO e EA, verifica-se um achatamento da distribuição, que reduz a frequência das velocidades mais baixas e aumenta a frequência de velocidades mais altas, especialmente quando se compara a fase mais “energética” de um modo com fase menos “energética”.

Observando o tipo de distribuição obtida repara-se que as variações da frequência das classes de velocidades mais baixas (variações associadas às fases) não provocam uma alteração da potência. Isto é, o efeito na potência só existe quando a variação de frequência relativa da velocidade se dá nos escalões de velocidade a partir da velocidade de arranque. Visualmente, esta zona de interesse corresponde a todo o intervalo entre a velocidade de arranque e a velocidade a que se começa a ter produção à potência nominal – a zona que engloba o início e subida da curva de potência e o decréscimo da frequência relativa da intensidade. As variações da frequência de velocidade nessa zona são as que necessariamente vão contribuir mais para a diferença de potência de diferentes fases.

Este enquadramento de análise resulta em grande medida do facto que a curva de potência, após um crescimento inicial quase linear, começa a crescer abruptamente – até começar a estabilizar na potência nominal.

Esta situação será ilustrativa de locais com intensidades médias mais elevadas. Nos histogramas de Penhas Douradas pode-se verificar (embora em grau reduzido): como a média da intensidade do vento (5.56 m/s) está acima da velocidade de arranque (3.5 m/s) há, na zona “produtiva” da curva, escalões de velocidade que verificam tanto aumento de frequência relativa associada à fase “energética” (escalões de velocidade maior, à direita da média) - como escalões de velocidade, que associados à mesma fase, têm uma frequência menor (à esquerda da velocidade média).

Os dois exemplos de Coimbra e Penhas Douradas são úteis para ilustrar a importância da relação entre as velocidades de vento absolutas (média de um local), a forma da distribuição do histograma de frequências de cada velocidade (desvio-padrão) e a curva de potência para o aerogerador escolhido. O posicionamento e forma da distribuição das velocidades de vento relativo à curva de potência vai influenciar a magnitude que as variações de estado atmosférico associado à variação dos modos têm na potência eólica de um local. Ou seja, para um dado sinal de intensidade, os parâmetros de natureza humana (velocidade de arranque, potência nominal e curva de resposta do aerogerador) podem atenuar ou amplificar o efeito dos modos na potência eólica do aerogerador.

Verificam-se, assim, diferentes respostas (ao longo da curva de potência) do aerogerador em função da velocidade. Os histogramas de frequência da potência conseguem, de certa maneira, discernir o impacto dos modos climáticos na potência eólica. No entanto, dada a gama de potências de produção (desde cerca de 35 kW até 3000 kW), a sua representação neste tipo de histogramas teve que ser adaptada, como se fez para os histogramas apresentados na Figura 21. Assim, a última coluna de frequência de todos os próximos histogramas de potência contém o somatório de todas as frequências de potência entre 450 kW e a potência nominal (3000 kW).

A Figura 23 representa os histogramas da potência do aerogerador para cada modo (individual), para Coimbra (esquerda) e Penhas Douradas (direita). As cores indicam a fase do modo em questão. Coimbra verifica a não-produção a maior parte do tempo. Pelo contrário, em Penhas Douradas observa-se que a frequência [0-50] kW de cada fase de qualquer modo é inferior a metade do tempo.

3. Resultados e Discussão

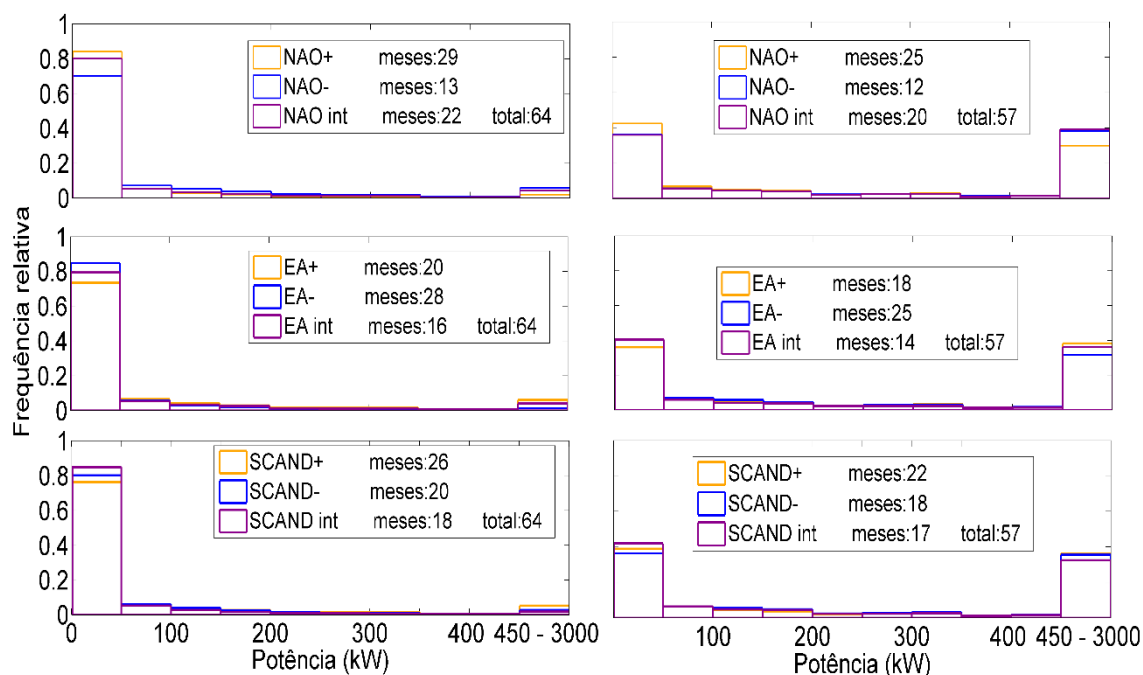


Figura 23: Histogramas de potência para Coimbra (esquerda) e Penhas Douradas (direita), por cada fase de cada modo. Os gráficos estão divididos por modos (1º NAO 2º EA 3º SCAND). Os histogramas, em cada gráfico, estão divididos por fase do respetivo modo, indicado por diferentes cores. Na legenda é indicado também o número de meses usados para caracterizar cada fase.

Na Figura 24 pode-se observar os histogramas da intensidade do vento para Coimbra (esquerda) e Penhas Douradas (direita) em situações de combinações de modos (ignora-se as combinações com as fases intermédias). Nos histogramas da intensidade verifica-se o interação entre a média da variável e o achatamento da distribuição.

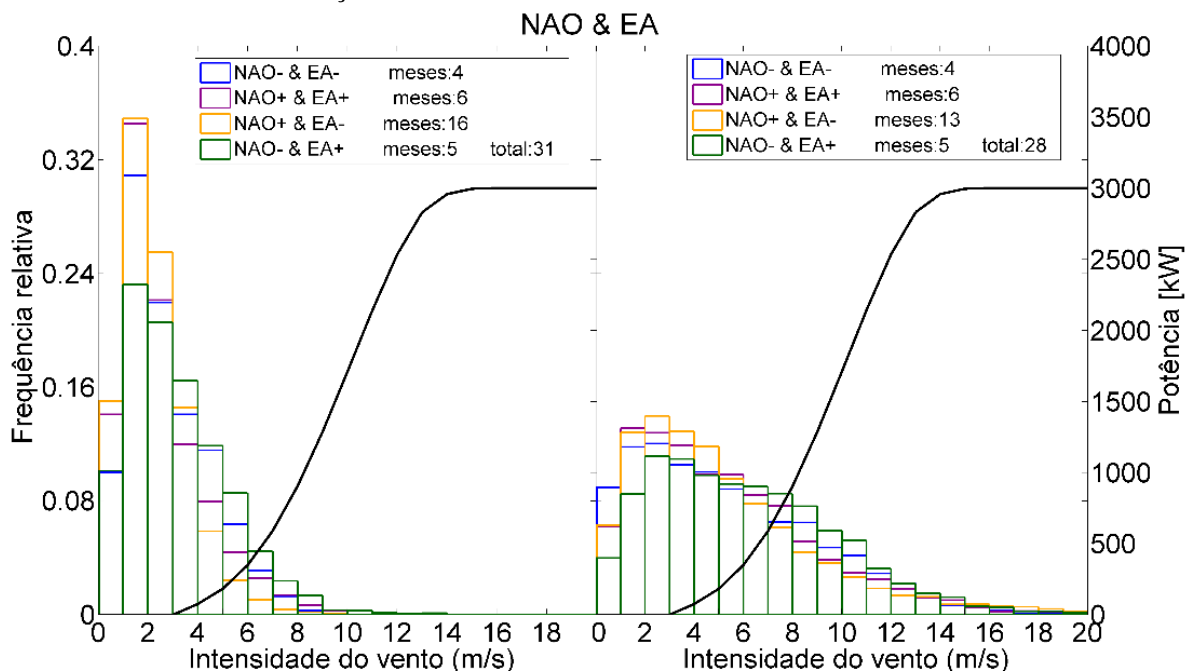


Figura 24: Histogramas da intensidade do vento para Coimbra (esquerda) e Penhas Douradas (direita). Os histogramas estão divididos por cores, cada uma representando uma combinação entre fases de 2 modos (NAO e EA). Ambos os histogramas têm sobreposta a curva de potência para o aerogerador modelado.

No histograma da potência da Figura 25 podemos identificar as combinações que potenciam um maior fator de capacidade ao aerogerador. Em particular, verifica-se que a combinação $(NAO^- EA^+)^0$ é claramente a que está associada a velocidades consistentemente mais elevadas em relação à média. O último escalão de potência permite também discernir melhor os modos individuais com mais importância.

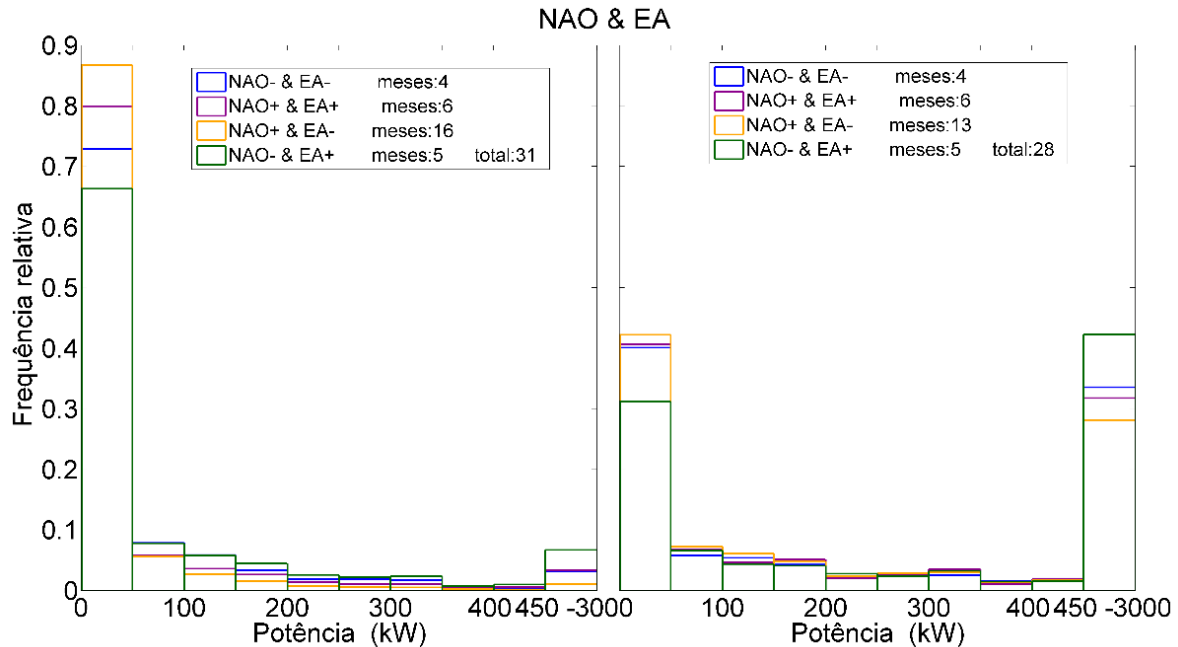


Figura 25: Histogramas da potência para Coimbra (esquerda) e Penhas Douradas (direita). Os histogramas estão divididos por cores, cada uma representando uma combinação entre fases de 2 modos (NAO e EA).

Nas Penhas Douradas observa-se que a magnitude do impacto da fase da EA varia consideravelmente consoante a fase da NAO presente. Se a NAO estiver na fase negativa, a variação da fase da EA provoca uma variação de cerca de 30% na frequência do último escalão de potência (de uma frequência relativa de cerca de 0.30 para 0.40). Se a NAO estiver na fase positiva, a variação da fase da EA é bastante menor. Isto confirma uma lógica de atenuação ou amplificação consoante a combinação dos modos. Neste caso indica que a NAO negativa estabelece as condições para que a variação da fase da EA seja a mais impactante, dentro da sua variação individual. O mesmo se passa no sentido inverso: a variação da fase da NAO tem a maior magnitude de variação se a EA estiver na fase positiva (cor magenta para cor verde) – uma variação de também cerca de 30% na frequência do último escalão. Para Coimbra e Penhas Douradas, as seguintes combinações de fases têm o maior impacto na variação da potência média do local: $(NAO^- EA^+)^0$ e $(NAO^+ EA^-)^0$; a primeira provoca o maior aumento da potência média, a segunda a maior diminuição da potência média (em relação à climatologia do local). Ambas as maiores variações estão associadas a combinações de modos com fases opostas. Assim, as maiores variações associadas ao local (estado mais energético menos estado menos energético) verificam-se na diferença entre esses dois estados.

De notar que dos cerca de 30 meses em que se verificaram combinações destes modos, a combinação associada a um recurso menos energético, $(NAO^+ EA^-)$, deu-se aproximadamente metade do tempo (Tabela 3, ou ver legenda na Figuras 25).

Os histogramas combinados também fornecem informação útil sobre a importância de cada modo individual. Isto porque sempre que se faz uma análise a um modo individual (p.e. histogramas de frequências individuais) de acordo com as suas fases, estamos a ignorar o efeito de outros modos climáticos. Se observarmos o histograma de velocidades de Penhas Douradas para a NAO, verifica-se que a diferença entre a fase negativa da NAO e a intermédia é relativamente reduzida – isto porque

independentemente da NAO, há outro(s) modo(s) a oscilar entre fases, comportamento não tomado em conta numa análise restrita à NAO. Assim, em locais onde se verifica a influência de mais do que um modo climático, a análise combinada é necessária, mesmo para obter informações acerca do impacto de cada um dos modos de variabilidade.

As Figuras 26 e 27 contêm os histogramas de intensidade do vento e potência, respectivamente, para Coimbra (esquerda) e Penhas Douradas (direita). Em ambos os casos, a combinação que estabelece um regime atmosférico mais intenso é a (EA⁺ e SCAND⁺)^S. Também para Penhas Douradas essa é a combinação que garante as condições de maior potência. Para Coimbra, (EA⁻ e SCAND⁻)^S é a combinação que verifica a menor potência. Para Penhas Douradas, apesar do impacto dessa combinação ser semelhante, é a (EA⁻ e SCAND⁺)^O - cor amarela, que estabelece o estado menos energético.

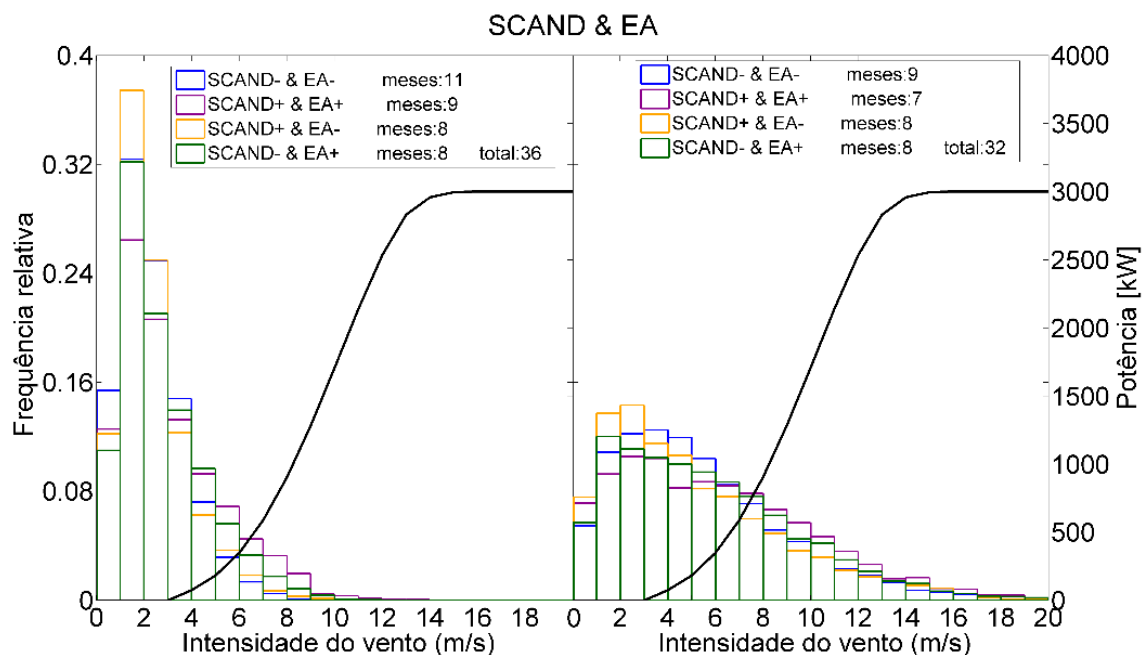


Figura 26: Igual à figura 24, relativo à combinação SCAND e EA.

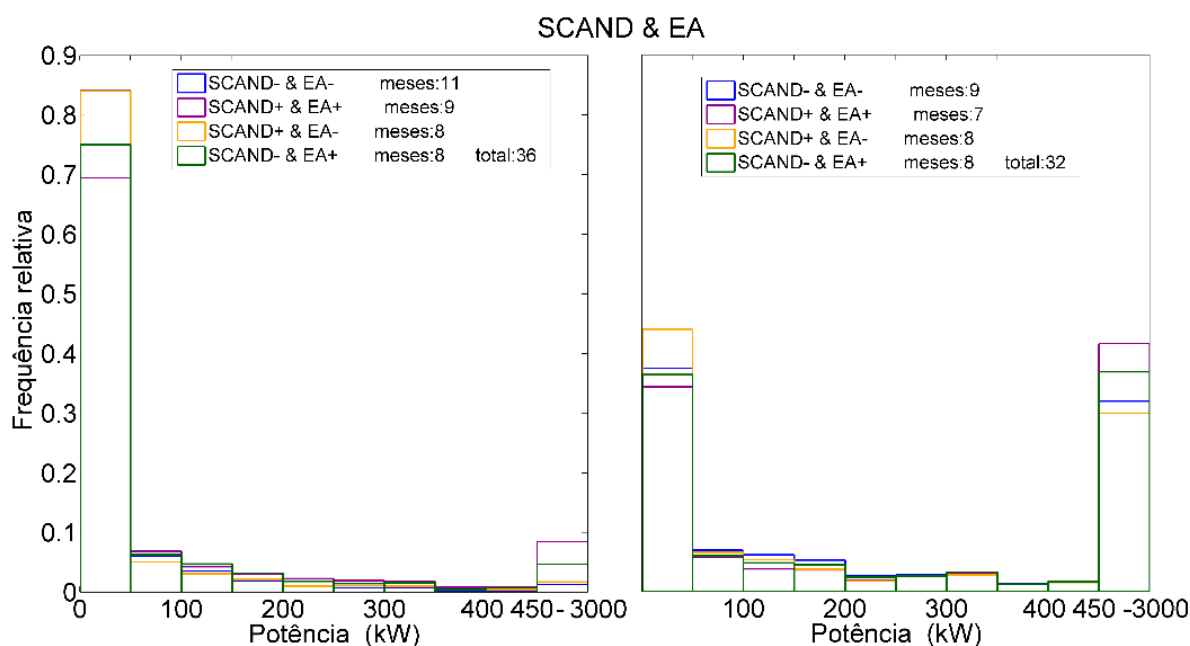


Figura 27: Igual à figura 25, relativo à combinação SCAND e EA.

A Figura 28 apresenta a variação de potência média associada a cada fase, para todos os modos, e a combinações de fases de modos diferentes. No total são considerados 21 estados distintos, 9 estados individuais (3 estados para cada um dos modos) mais 12 estados associados às várias combinações possíveis entre os 3 modos considerados (excluindo fases intermédias). A variação de potência é representada para cada localização com um marcador distinto.

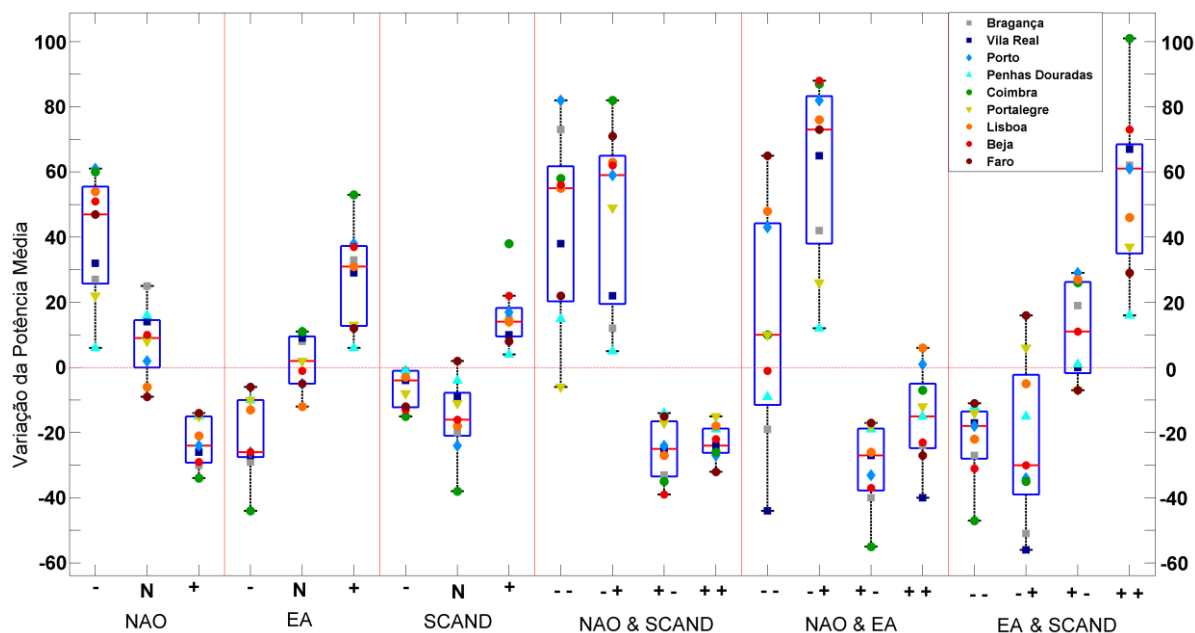


Figura 28: Variação de potência média associada a cada fase, para todos os modos, e a combinações de fases de modos diferentes (no total, 21 estados). A variação está expressa percentualmente, em relação à climatologia (média de cada local). Em cada caixa azul, a linha horizontal vermelha representa a mediana e os limites inferiores e superiores da caixa correspondem aos percentis 25 e 75 %.

Na Figura 28 podemos comparar o impacto de cada estado na potência média de cada local, bem como a dispersão do impacto para o conjunto de localizações. A sua disposição permite comparar visualmente o impacto entre diferentes estados para a mesma localização bem como o mesmo estado para o conjunto de locais. A Figura 28 inclui todas as localizações independentemente da sua correlação com os modos climáticos. É de realçar no entanto que nem todas as localizações têm correlações significativas com os diferentes modos climáticos.

Interessa calcular a variação de potência, para cada modo ou combinação de modos, entre os estados mais energético e o estado menos energético. Essa amplitude (no que toca à potência média) pode ser observada na Figura 28, para cada localização. No entanto, para se apresentar de uma forma mais explícita essa informação; para uma melhor comparação entre locais; e para se poder comparar com resultados apresentados posteriormente, essa amplitude de potência será apresentada na Figura 39, com um código de cores que será usado pela primeira vez na Figura 33.

3.3 Correlações com as médias temporais

A Figura 29 pretende agregar visualmente estações com resultados semelhantes em termos de correlação significativa com os índices dos modos (nível de significância de 99 %), para cada variável em análise (intensidade, direção ou potência). Os resultados com a SCAND só atingem níveis de significância de 95 %, no entanto. As diferentes cores representam cada um dos modos. Assim a existência de relações significativas para a NAO (verde), EA (vermelho) e SCAND (azul) estão visualmente explicadas para cada variável. Adicionalmente, também são apresentados resultados com base na modelação do comportamento de cada variável com recurso a modelos de regressão linear (MLRM), como discutido na secção da metodologia. Assim, as linhas negras englobam as estações que cumprem as seguintes condições:

3. Resultados e Discussão

1. a série modelada inclui pelo menos dois modos climáticos como preditores;
2. a sua correlação com a série observada é significativa, com um coeficiente de correlação superior a 0.50 e;
3. que apresente um valor de correlação substancialmente superior à correlação obtida com somente um modo.

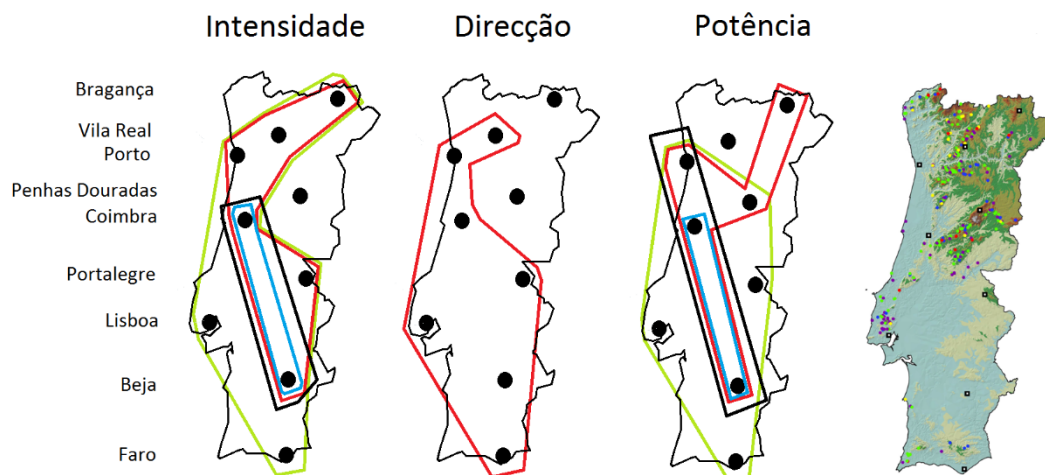


Figura 29: Mapas com a localização das estações (círculos pretos). As estações com correlações estatisticamente significativas, para cada variável (intensidade, direção e potência), estão englobadas por linhas coloridas representando diferentes modos climáticos – NAO (verde), EA (vermelho), SCAND (azul). As linhas negras referem-se às estações com uma relação estatisticamente robusta com pelo menos dois modos climáticos, simultaneamente, relação evidenciada com modelos de regressão linear. O mapa da direita, já apresentado anteriormente com uma dimensão maior, indica a localização dos parques eólicos em Portugal.

Para a direção, como se pode ver pela Figura 29, a EA apresenta coeficientes de correlação significativos em todos os locais ($p < 0.01$, excepto Penhas Douradas e Bragança que são a $p < 0.05$). Relativamente à NAO, apenas as localizações de Beja e Coimbra verificam a existência de uma relação estatisticamente significativa com a direção ($p > 0.05$). A Tabela 7 apresenta os coeficientes de correlação para todas as estações e a diferença entre o estado mais energético e o estado menos energético (amplitude máxima de variação de potência, em kW e em percentagem).

	NAO			EA			SCAND		
	Correlação	NAO ⁺ - NAO ⁻		Correlação	EA ⁺ - EA ⁻		Correlação	SCAND ⁺ - SCAND ⁰	
	r	[kW]	[%]	r	[kW]	[%]	r	[kW]	[%]
Bragança	-0.30*	-33	58	0.44	37	63	0.16	20	35
Vila Real	-0.24	-15	58	0.28*	14	55	0.13	5	19
Porto	-0.51	-107	85	0.48	80	64	0.23	51	41
Penhas Douradas	-0.27	-129	21	0.30	97	16	0.10	48	8
Cernache (Coimbra)	-0.42	-55	95	0.51	56	97	0.33	44	76
Portalegre	-0.45	-59	38	0.24	37	24	0.18	38	25
Lisboa	-0.53	-85	74	0.32*	51	45	0.20	37	33
Beja	-0.54	-82	80	0.46	65	63	0.33	39	38
Faro	-0.47	-120	61	0.18	36	18	0.17	11	6

Tabela 7: Para cada estação está apresentada o coeficiente de correlação entre cada modo individual e a potência; a amplitude máxima de potência em unidades de potência (kW) e percentagem (%). Realçados estão as correlações significativas a $p < 0.01$ (negrito), e a $p < 0.05$ (itálico, realçado com asterisco*)

3.3.1 Potência

A Figura 30 apresenta as correlações entre a potência média mensal e os modos climáticos.

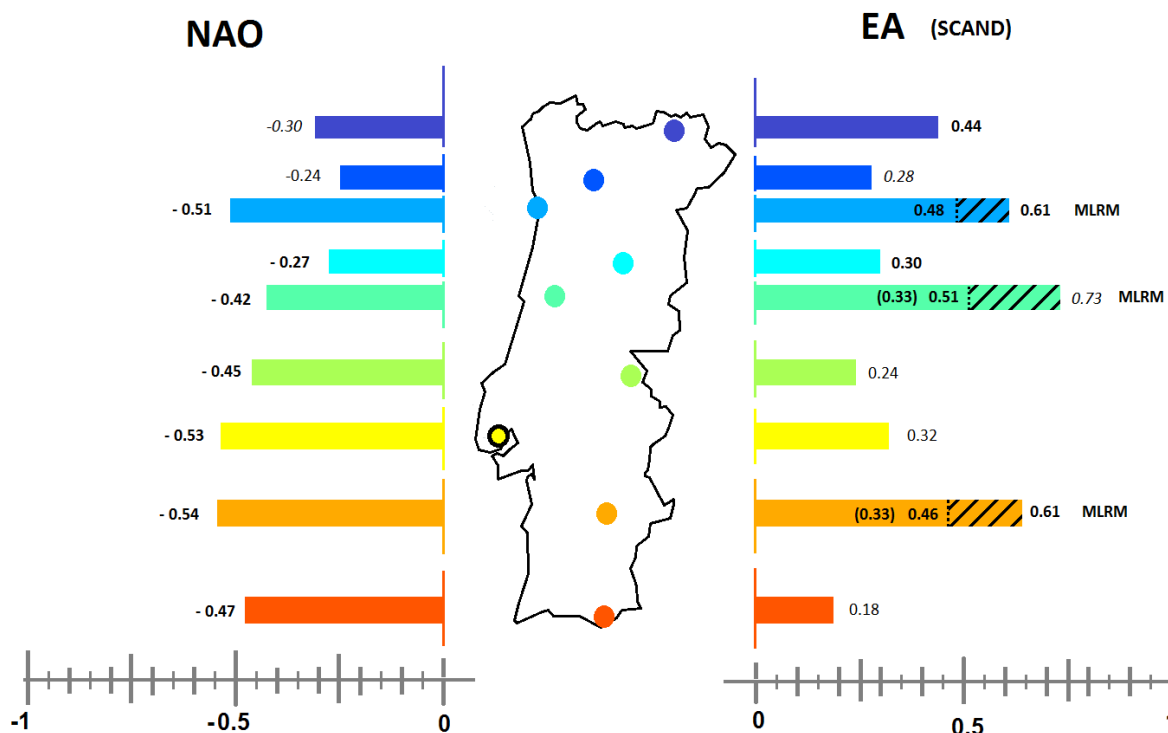


Figura 30: Coeficientes de correlação entre a potência de cada local e o modo climático – à esquerda, NAO; à direita, EA (SCAND). Para Porto, Coimbra e Beja também se introduziu, à direita, a correlação entre a potência e a potência modelada (MLRM) com a inclusão de todos os modos como preditores, excepto para o Porto, que só inclui a NAO e a EA. O acréscimo no coeficiente de correlação, para estes 3 locais, está discriminado com um padrão de linhas pretas na diagonal. Período analisado 2000-2012, excepto Vila Real e Penhas Douradas cujo período foi 2001-2012.

Apesar da Figura 30 fornecer informação clara sobre a distribuição latitudinal da amplitude dos impactos dos modos, é necessário que se tenha em consideração o efeito orográfico tanto na intensidade como na direção do vento. Nessa figura, os níveis de significância estatística estão discriminados da seguinte forma: **99 %** a negrito; *95 %* a itálico; 90 % em sublinhado.

Observa-se que a correlação com a NAO para os sítios de menor altitude varia entre 0.47 (Faro) e 0.54 (Beja). Os locais mais elevados apresentam valores mais baixos de correlação.

Para a EA, com excepção de Beja (0.46), as correlações só são significativas em estações do Centro-Norte, mais especificamente a partir de Coimbra, variando entre 0.28 (Vila Real) e 0.51 (Coimbra). Em todos esses locais a EA explica mais variação da potência do que a NAO.

Os valores entre parêntesis, na Figura 30, representam as correlações entre a potência e o 3º modo, a SCAND – significativas somente em Beja (0.33) e Coimbra (0.33). Estas correlações não estão dispostas com uma barra colorida, pois só existem em dois locais e a sua adição na Figura 30 iria torná-la demasiado densa. Na Figura 30 verifica-se claramente que, nos locais onde mais do que um modo actua de forma significativa (a $p < 0.01$), a sua inclusão aumenta a variabilidade explicada da variável observada (neste caso a potência). Isso pode ser observado através do aumento dos coeficientes de correlação para modos combinados (indicado na figura com MLRM), em relação aos coeficientes de correlação obtidos para modos individuais – com destaque para Coimbra (Figuras 31 e 32), Beja e Porto. O acréscimo no valor do coeficiente de correlação, em relação aos valores obtidos com modos individuais, está discriminado nas barras coloridas com um padrão de linhas pretas diagonais.

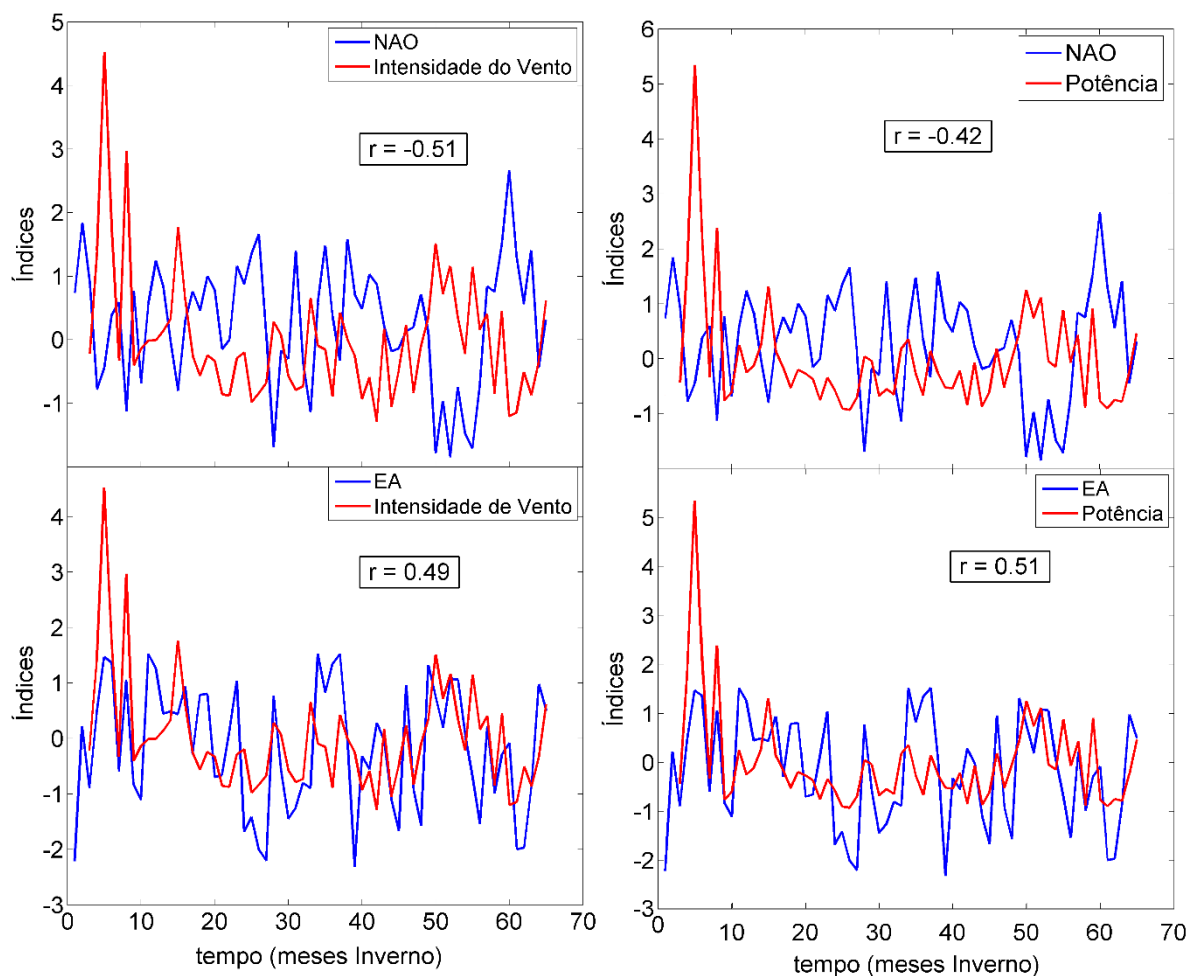


Figura 32: Séries temporais normalizadas: em cima à esquerda, NAO (azul) com intensidade de vento (vermelho); em cima à direita, NAO (azul) com potência (vermelho). Em baixo o mesmo mas com o modo EA. Também se indica o valor de cada coeficiente de correlação. Todas as séries, médias mensais, dizem respeito a Coimbra. Período 2000-2012.

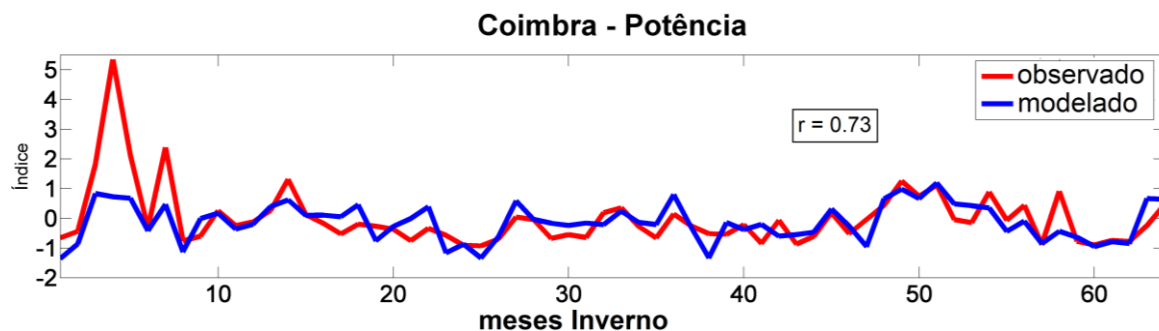


Figura 31: Série temporal da potência observada em Coimbra com a potência modelada com a inclusão dos 3 modos como preditores e o correspondente coeficiente de correlação (Spearman) está apresentado. Mesmo período temporal que a Figura 33.

A série modelada para Coimbra, apresentada na Figura 32, contém os 3 modos climáticos como preditores, todos incluídos no modelo, com uma significância estatística de $p < 0.05$ (SCAND e $p < 0.01$, a NAO e EA).

3.3.2 Direção do Vento

A Figura 33 (com uma configuração semelhante à Figura 30) representa a variação latitudinal dos coeficientes de correlação entre a direção média mensal do vento de cada estação e o respectivo modo climático. Adicionalmente, no lado direito (e com a mesma disposição), estão as correlações entre a potência e a direção.

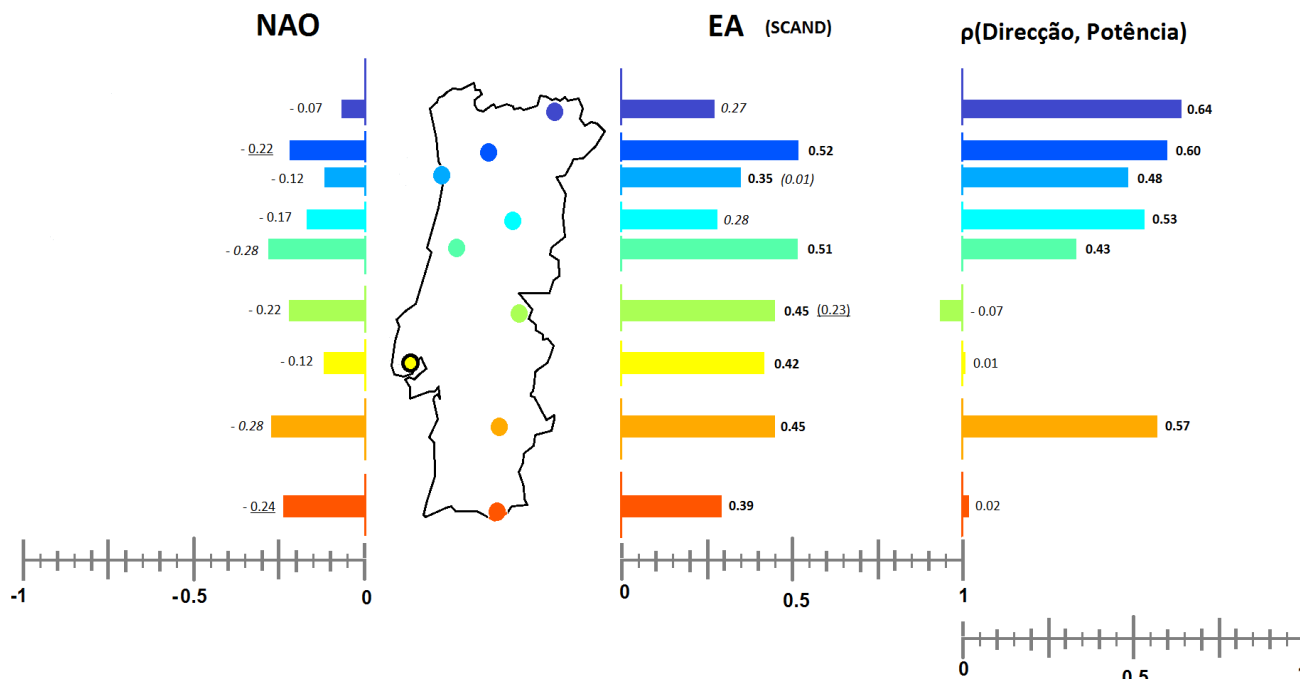


Figura 33: Coeficientes de correlação entre a direção média de cada local e o modo climático – à esquerda, NAO; à direita, EA (SCAND). No extremo direito estão, organizados da mesma maneira vertical, os coeficientes de correlação entre a direção e a potência em cada local. Período analisado igual ao da Figura 32.

Na Figura 33 pode-se observar que, em todos os locais estudados, a direção dos vento correlaciona-se significativamente com a EA, ao contrário da NAO. São obtidos sempre coeficientes de correlação superiores com a EA, desde cerca de 0.30 (Bragança e Penhas Douradas) a 0.50 (Coimbra e Vila Real). Relativamente à NAO, somente Coimbra e Beja ($p < 0.05$) e Faro e Vila Real ($p < 0.10$) demonstram correlações significativas. No entanto, os coeficientes de correlação são baixos e nunca significantes ao nível dos 99 %.

Na Figura 30 observou-se que, para a potência, as localizações com correlações significativas com a EA comparáveis ou superiores às correlações com a NAO observam-se nas localizações a Norte de Coimbra e Beja. Cruzando esse zoneamento latitudinal com o facto de as direcções dos ventos correlacionam-se melhor também com a EA (em detrimento da NAO), explica que a direção nos vários locais se correlacione bem com a potência nas localizações na região Norte e Beja, como se pode ver no painel à direita da Figura 33.

As correlações entre direção e potência nos diferentes locais são semelhantes ao padrão espacial das correlações entre a direção e a intensidade dos ventos (não apresentadas aqui), excepto em Vila Real, onde o coeficiente aumenta para 0.73; Porto, que diminui para 0.28, a $p < 0.05$; e Portalegre que aumenta para 0.27, ganhando significância ao nível $p > 0.1$. Todas as outras estações com correlações significativas mantêm as suas significâncias e o valor dos coeficientes de correlação varia menos de 0.05.

De forma a analisar toda a gama de valores de velocidade e direção do vento associadas às diferentes fases dos modos estudados, apresentam-se de seguida os histogramas angulares correspondentes aos exemplos de Coimbra, Vila Real e Penhas Douradas. Para Coimbra analisam-se os dois modos climáticos pois verificam-se diferenças importantes entre os vários estados associados às fases da NAO e EA.

3. Resultados e Discussão

Para os vários locais considerados nesta secção (Penhas Douradas, Coimbra e Vila Real), o aumento da frequência da direção associada à fase positiva da EA observa-se para octantes diferentes mas restringidos ao sector S-W. Nos locais com as correlações mais elevadas com a EA (Coimbra e Vila Real), a fase positiva da EA aumenta a intensidade dos ventos e a frequência de ventos de Sul, como se pode ver na Figura 34 e 35, para os respectivos casos (assim como para Beja, em anexo).

NAO: Diferença (fase positiva-negativa)

EA: Diferença (fase positiva-negativa)

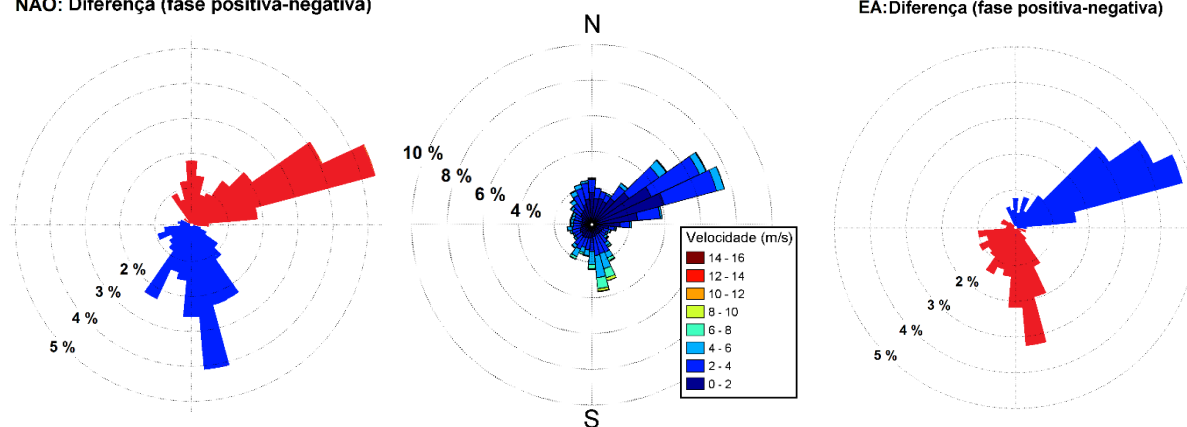


Figura 34: Histogramas angulares da direção dos ventos, referente a Coimbra. O histograma central representa a climatologia do local no Inverno. Os histogramas laterais representam a diferença entre a fase positiva e a negativa para a NAO (esquerda) e a EA (direita). Nesses histogramas está discriminada a direção onde há aumento ou diminuição da frequência dos ventos, sendo que a cor vermelha (azul) indica um aumento da direção associado à fase positiva (negativa).

Relativamente à NAO as estações de Coimbra (Figura 34) e Beja (anexo), verificam um aumento da frequência de ventos de Sul associados à sua fase negativa, isto é a fase mais energética.

É de salientar que o aumento na intensidade dos ventos associado às fases mais energéticas dos modos não está restrito às direções de onde se verifica o aumento de frequência. Ou seja, o aumento na intensidade dos ventos pode ser direccionalmente mais ou menos difuso. Essa expressão, ou forma, do aumento na frequência da direção dos ventos aparenta depender da localização e dos condicionamentos topográficos que o local apresenta.

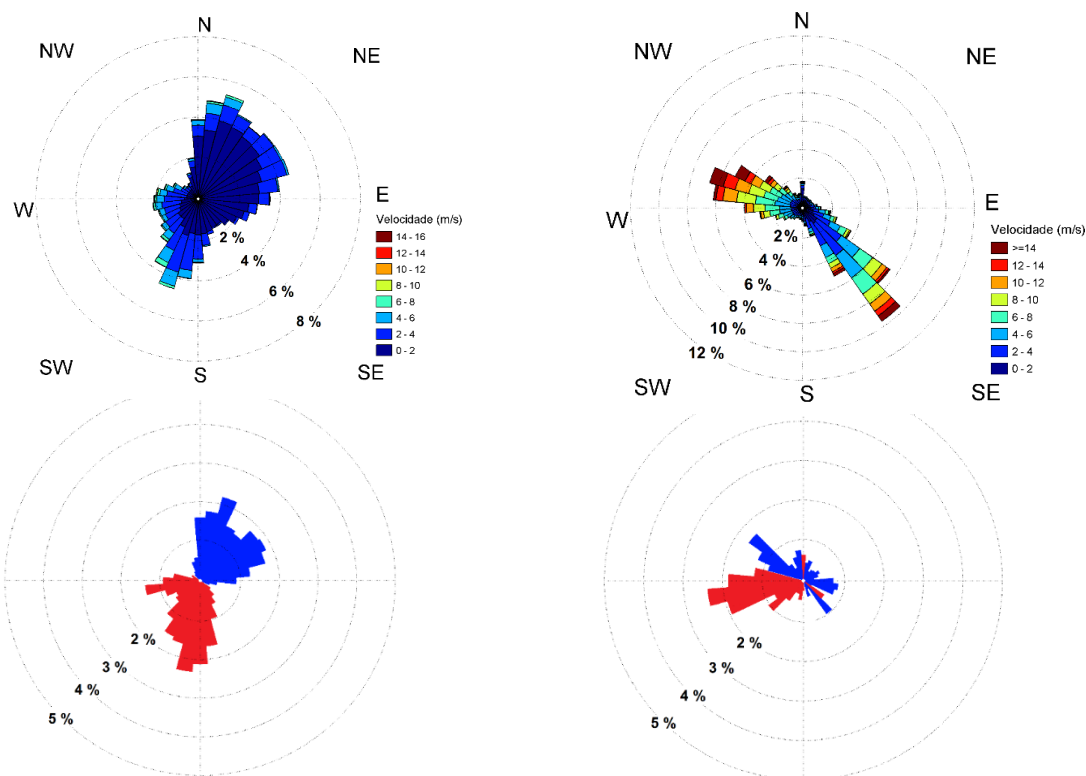


Figura 35: Histogramas angulares da direção dos ventos, referente a Vila Real (esquerda) e Penhas Douradas (direita). Os histogramas de cima representam a climatologia dos locais no Inverno. Os histogramas de baixo representam a diferença entre a fase positiva e fase negativa para EA. Nesses histogramas está discriminada a direção onde há aumento ou diminuição da frequência dos ventos, sendo que a cor vermelha (azul) indica um aumento da direção associado à fase positiva (negativa). Os histogramas das fases, para estes locais, podem ser consultados em anexo.

Nas Penhas Douradas (Figura 35, direita) a climatologia da direção do vento demonstra uma frequência polarizada entre duas direções opostas (W-WNW e SSE-SE), o que sugere a existência de um fator condicionante bastante forte (talvez orográfico). Ainda assim, a correlação temporal da direção dos ventos de Penhas Douradas só é significativa para a EA. Assim, nas Penhas Douradas, a fase positiva da EA aumenta a frequência da direção dos ventos de W-SW (3º quadrante). Isso indica que uma combinação de fatores que definem as condições do local – a sua altitude, as massas terrestres que bloqueiam, condicionam ou conduzem o vento – podem aumentar ou atenuar a expressão de um modo.

A interação entre dois modos climáticos pode ser ilustrada com o caso de Coimbra, na Figura 36. Esta figura contém 4 rosas dos ventos associadas aos 4 possíveis estados resultantes da interação entre as fases da NAO e EA.

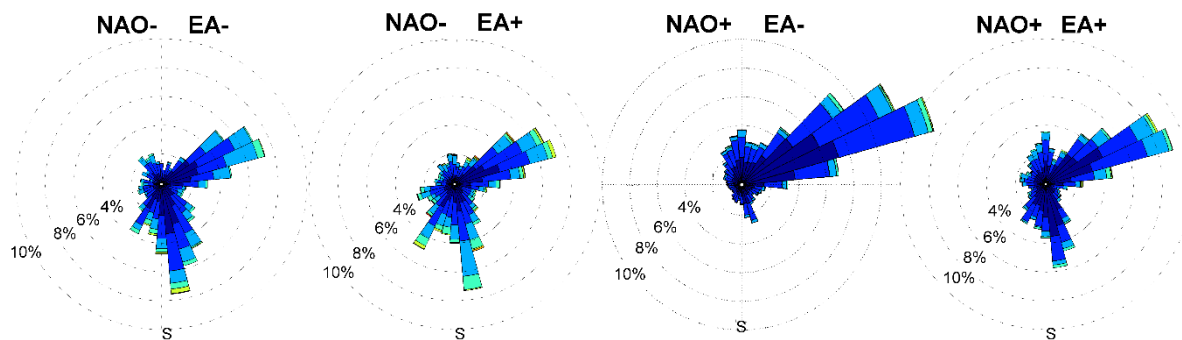


Figura 36: Histograma angular para as 4 combinações das fases positivas e negativas entre os modos NAO e EA. Em cima dos histogramas está indicada a combinação de fases. Referente a Coimbra, período 2000-2012.

Confirma-se que a fase positiva da EA induz ventos predominantes do quadrante Sul. Consoante condições do local, como a orografia, poderão ser canalizados para diferentes direcções no quadrante. Isto indica que a orografia de um local pode criar situações de interação sobre: qual o modo para o qual aceita a expressão da fase mais energética; a possibilidade de aceitar a expressão dos dois modos; e/ou as fases dos diferentes modos terem semelhanças de impacto direccional e logo poderem incrementarem-se no que toca à canalização do fluxo e logo à sua intensidade e potência. Também indica que a orografia pode criar situações em que atenua o efeito de um modo nos ventos nessa área/região continental, e logo esse local está menos ou não correlacionado com a variação das fases de um modo.

O impacto da NAO provoca um reforçamento dos ventos meridionais (vento geostrófico), numa linha nodal situada entre os centros de pressão, como referido na introdução. A EA, sendo, à semelhança da NAO, um dipolo de anomalias predominantemente Norte-Sul, apresenta o mesmo impacto de reforço de ventos meridionais. No entanto, devido à localização do centro de acção Norte da EA, essa linha nodal, com direcção do quadrante W-S atravessa sensivelmente o território português, particularmente o Centro e Norte de Portugal. Isso pode justificar o facto de, em todas as localizações, a EA ser o modo com as melhores correlações com a direcção do vento, e as únicas correlações significantes a $p < 0.01$, exceptuando para Penhas Douradas e Bragança ($p < 0.05$). Beja e Coimbra demonstram uma correlação reduzida com a NAO, ainda que significativa ($p < 0.05$).

Em Portugal, as zonas de maior densidade da potência eólica correspondem às zonas montanhosas do Centro-Norte do território, em particular nos grandes sistemas montanhosos ibéricos. Isto deve-se ao facto de estas zonas estarem associadas a maiores intensidades médias de vento e a ventos com direcção mais uniformes e mais canalizados (menos turbulentos), exigindo menor gestão direccional do aerogerador, e, por isso, maior eficiência de captura do recurso. No entanto, como discutido, certas orografias podem reforçar ou atenuar a vulnerabilidade à mudança de regimes atmosféricos - isto é bastante visível na Figura 16, retirada de Jerez & Trigo (2013). Os sistemas montanhosos em Portugal organizam-se paralelamente a uma linha SW-NE, (e W-E, caso das elevações a norte de Viseu).

3.4 Modos climáticos e energia eólica produzida (2008-2014)

Foram apresentados os impactos de alguns modos de circulação na intensidade e direção do vento em vários locais (através de medições em estações meteorológicas) bem como na expectável produção com turbinas eólicas típicas. Neste trabalho, apesar dos locais com medições estarem dispersos por Portugal Continental, as condições atmosféricas que se verificam numa estação podem não ser representativas dos locais onde na realidade existem parques eólicos. Dos locais analisados, alguns são mais propícios de exploração eólica do que outros. Verifica-se também uma variação de amplitude das relações encontradas entre a circulação atmosférica e a produção eólica no contexto da produção eólica em Portugal. Como alternativa, é possível aferir o impacto dos modos de variabilidade na própria produção de energia eólica em Portugal à semelhança do que foi feito para Espanha (Jerez et al., 2013). Isto é possível através de dados reais de produção eólica que foram possíveis obter. O período em análise começa em Outubro de 2007 e termina em Março de 2014, constituindo assim uma amostra de 7 Invernos, estação à qual se restringe a avaliação.

3.4.1 Produção Mensal

Como referido na secção 2.8, os dados da energia eólica produzida são mensais e tiveram que ser normalizados de acordo com a capacidade instalada na altura de produção. Obteve-se assim uma série temporal normalizada da energia produzida (*Normalized Wind Power Generation*, NWPG, expressa em número de horas de funcionamento à potência instalada.), que pode ser comparada diretamente com os índices mensais dos modos climáticos. Os vários modos podem ser enquadrados simultaneamente, como preditores, num modelo de regressão múltipla (MLRM) que modele uma série temporal de energia (modelada), que pode ser comparada com a série original. A Figura 37 mostra as séries mencionadas (observada e modelada) bem como as séries temporais (dos índices) dos modos climáticos NAO e EA, usados como preditores.

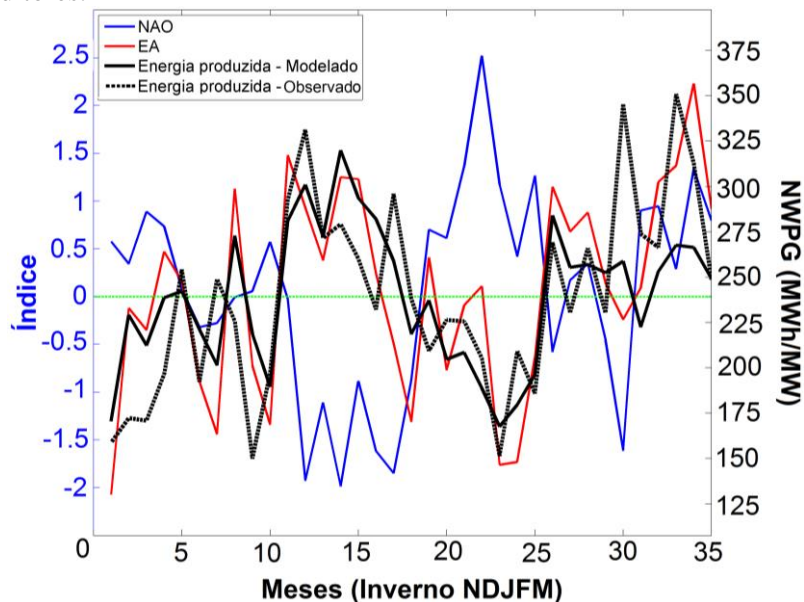


Figura 37: Série temporal da energia eólica produzida mensalmente (observado – linha preta a tracejado; modelada – linha preta contínua); preditores usados no modelo: NAO (azul) e EA (vermelho), modos que foram usados como preditores. Período 2008 – 2014.

A média temporal usada para definir o valor de Inverno nas séries da Figura 37 corresponde aos meses NDJFM, período que maximiza os valores de correlação. O coeficiente de correlação entre a série da energia observada e a modelada é de 0.73, com uma significância estatística de 99 % (correlação de Spearman).

Na Tabela 8, podemos ver o valor das correlações (*Pearson*) entre os índices mensais dos modos climáticos e a energia eólica produzida em cada mês do Inverno. Na mesma tabela estão também os valores de correlação (*Pearson e Spearman*) entre a série temporal de energia original e a série modelada (MLRM), para dois níveis de significância (95 e 99 %, indicado na última linha).

Na Tabela 8, além dos resultados considerando o Inverno como sendo de Novembro a Março (NDJFM), também se apresentam os resultados considerando outras definições de Inverno, nomeadamente: Outubro a Fevereiro (ONDJF) e Dezembro a Fevereiro (DJF). Na Tabela 8, as cores de fundo pretendem indicar a que nível de significância os índices dos modos são incluídos na modelação da série temporal de energia. Desta forma, a cor verde no fundo é indicativa que esse modo climático entra no modelo a $p < 0.01$ e o mesmo é válido para a cor azul, mas com $p < 0.05$. Esta distinção surge da necessidade de distinguir a significância estatística da série modelada da significância estatística das correlações modo individual – energia.

Tabela 8: Correlações entre cada modo climático e a energia eólica produzida mensalmente para diferentes definições de Invernos. Apresenta-se também correlações (Pearson e Spearman) entre a série temporal da energia observada e a energia modelada com os índices de dois modos climáticos, para dois níveis de significância. Na última coluna está indicado o número de meses total considerado em cada caso de diferente média temporal.

	NAO	EA	SCAND	MLRM				Meses (amostra)
				(95 %)		(99 %)		
				r_p	r_s	r_p	r_s	
ONDJF	-0.18	0.55	0.47	0.56	0.53	0.52	0.53	35
DJF	-0.44	0.59	0.34	0.68	0.73	0.54	0.55	21
NDJFM	-0.46	0.61	0.23	0.69	0.73	0.69	0.73	35

A EA é o modo climático com uma correlação mais elevada com a energia eólica produzida, entre 0.55 e 0.61, presente para todas as definições de Inverno. Como também se pode observar, médias temporais que considerem meses diferentes podem implicar uma selecção de um segundo preditor diferente – entre NAO e SCAND. Estes resultados são compatíveis, mas ligeiramente superiores aos valores obtidos para os locais significativamente correlacionados com a EA, apresentados na secção 3.3.1.

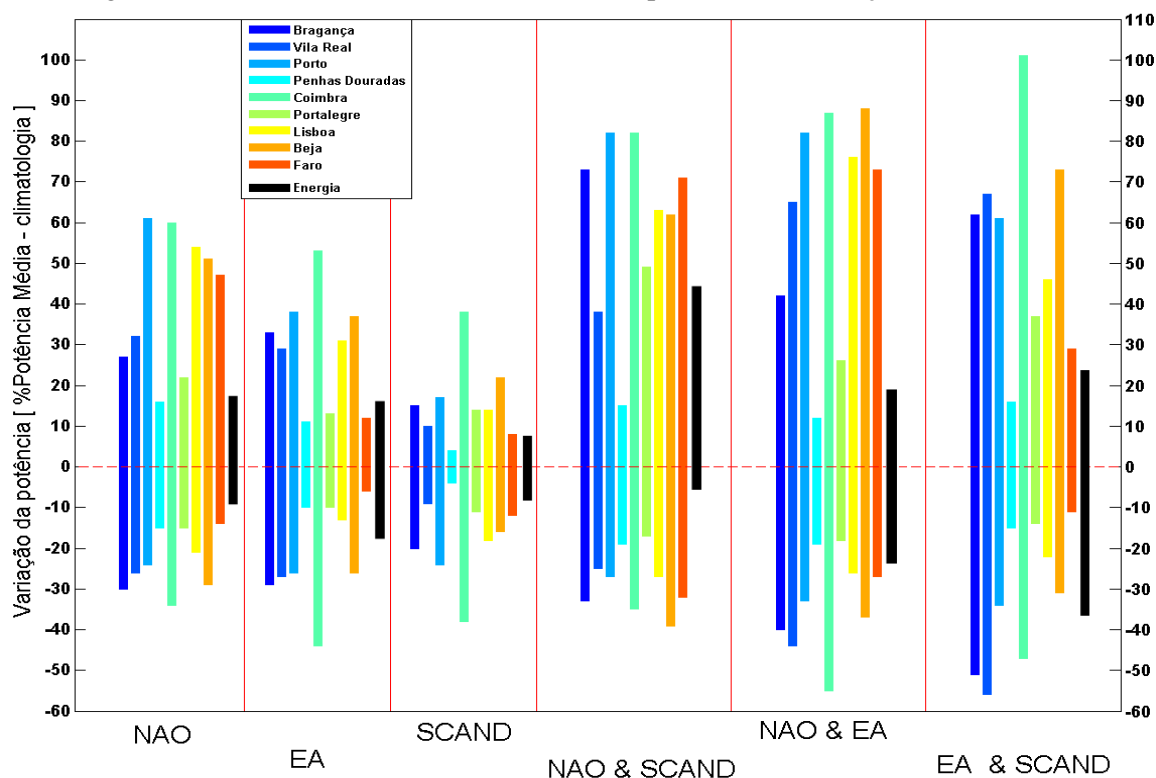


Figura 38: Magnitude máxima da variação de potência média (Período 2000-2012). Cada barra colorida representa um local diferente, consoante a cor indicada na legenda, exceto a barra preta. As barras pretas foram construídas com os dados da energia eólica produzida em Portugal, para um período diferente (2008-2014).

Para a energia produzida também se calculou a variação associada à fase positiva e negativa da EA, para se avaliar a amplitude de variação de energia produzida entre a fase menos energética (que é a fase negativa) e a fase mais energética (a fase positiva). Os resultados são expressos na Figura 38 (nas barras pretas), onde estão também os resultados referentes à amplitude máxima de potência média mensal em cada localização estudada anteriormente (barras coloridas).

Esta introdução dos vários resultados (amplitude de potência dos locais e amplitude de energia produzida, referente a Portugal) na mesma figura é possível pois ainda que as unidades de expressar a potência sejam diferentes (da energia), o facto de a variação ser expressa em termos relativos permite que estes resultados possam ser comparáveis. É de salientar que ambos os resultados expressam um contributo importante da NAO e da EA, com uma relação mais forte com a EA.

A fase positiva da EA está associada a um incremento de 16 - 19 % (fase negativa: menos 14-18 %) em relação à climatologia. Isso representa uma amplitude de variação de cerca de 34 %.

Na Figura 38 também estão as amplitudes máximas de energia produzida, associadas à variação de cada modo ou combinação de modos. De notar que, comparando a EA e a NAO, a barra encontra-se mais centrada em redor da climatologia para a EA do que para a NAO. Adicionalmente, de todos os modos individuais, é com as fases da EA que se verifica a maior amplitude de variação de potência.

3.4.2 Produção Anual

A nível interanual - considerando um valor por Inverno (ver secção 2.3) - o papel da EA evidencia-se, em detrimento da NAO.

Na Figura 39 estão as séries temporais da energia eólica produzida e da EA (esta última para 3 médias temporais considerando diferentes meses). Para a EA, usaram-se três definições distintas de Inverno, de forma semelhante ao que se descreveu no capítulo anterior (3.2.1). A Tabela 9 apresenta os valores dos coeficientes de correlação usando as diferentes médias temporais de Inverno tanto para a energia produzida como para os índices do modo *East Atlantic*.

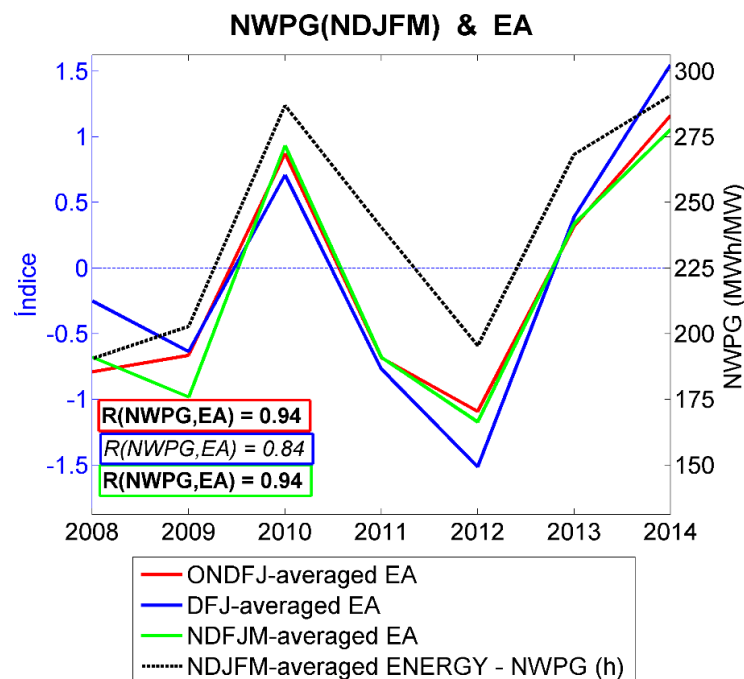


Figura 39: Série temporal da energia eólica produzida anualmente (observado – linha preta) mais EA (diferentes médias temporais, como indicado na legenda). Média temporal considerada - NDJFM.

Média temporal Inverno (2008 – 2014)		<i>East Atlantic pattern</i>		
		(NDJFM)	(ONDJF)	(DJF)
Energia produzida	(NDJFM)	0.94	0.94	<i>0.84</i>
	(ONDJF)	<i>0.85</i>	<i>0.87</i>	<u>0.73</u>
	(DJF)	0.90	0.92	<i>0.82</i>

Tabela 9: Correlações entre a EA e a energia produzida para diferentes definições de Inverno de ambas as séries. Resultados a negrito são significantes ao nível dos 99 %, a itálico ao nível dos 95 % e a sublinhado ao nível dos 90 %.

Também a SCAND apresenta valores de correlação entre os valores médios de inverno (para diferentes definições de inverno) e a produção real de energia eólica:

- Energia média NDJFM com SCAND (ONDJF) 0.77 a $p < 0.05$
- Energia média NDJFM com SCAND (DJF) 0.78 a $p < 0.05$
- Energia média ONDJF com SCAND (ONDJF) 0.69 a $p < 0.1$

No entanto, como só se analisaram 7 anos (Invernos) de energia produzida e dada a falta de correlações significativas em outras médias temporais, não se pode concluir sobre a relevância da SCAND.

Os resultados são explorados em mais detalhe para a EA (Tabela 10) devido às correlações consistentemente elevadas e significativas, com coeficientes de correlação na ordem dos 0.90. A magnitude de variação da produção eólica entre EA^+ e EA^- é de 34.1 %, em relação à climatologia, e esse valor é coerente com o valor de variação mensal representada em forma de barra preta na Figura 38.

Portugal		Variação da Energia Eólica Anual (h/mês) (energia média de NDJFM)		
(Intervalo de meses da EA)	(Climatologia) h/mês	EA^-	EA^+	($EA^+ - EA^-$)
NDJFM		207 (-13.4 %)	289 (+20.7 %)	
ONDJF	239	207	289	81 (34.1 %)
DJF		213 (- 11 %)	289	76 (31.7 %)
Por Inverno (NDJFM)	1196	1036	1444	408

Tabela 10: Produção eólica, expressa em horas de funcionamento à potência nominal (percentagem em relação à climatologia), associada à fase negativa e positiva da EA, para diferentes médias temporais. A última linha refere-se ao valor de produção eólica por Inverno (Novembro – Março).

A produção associada à climatologia é: $1196.35 \text{ h} \times 4500 \text{ MW} = 5384 \text{ GWh}$ por Inverno, para uma potência nominal instalada de 4500 MW (o valor actual da capacidade eólica continental). Por Inverno, entre a fase positiva e a negativa da EA temos uma variação de 408 horas de funcionamento à potência nominal, o que equivale a cerca de um terço da climatologia (expressa neste exercício em horas de funcionamento à potência nominal, por mês). Essa variação interanual representa em termos de energia $408 \text{ h} \times 4500 \text{ MW} \approx 1834 \text{ GWh}$. A proporção de variação em torno da climatologia verificada indica mais 1114 GWh para uma média da EA positiva no Inverno, e menos 720 GWh para uma fase negativa.

4. Conclusões

Neste trabalho procurou-se relacionar três modos de variabilidade em larga-escala (NAO, EA e SCAND) com a potência eólica e com a produção de energia eólica em Portugal. Os estudos de impactos dos modos climáticos na potência e na produção energética renovável são relativamente recentes e em muito menor quantidade que os estudos e literatura acerca do impacto dos modos em variáveis como a temperatura e precipitação, entre outros focos. Neste trabalho, o impacto dos modos climáticos foi estudado para o Inverno alargado de duas formas distintas, ainda que complementares:

Inicialmente, estudaram-se as possíveis relações existentes entre os índices de circulação dos modos e a potência eólica em várias estações meteorológicas da rede do IPMA para o período de 2000 a 2012. A potência eólica em cada um dos locais foi obtida a partir das intensidades de vento registadas nas respetivas estações meteorológicas, através de uma conversão da intensidade de vento em potência elétrica potencial - para tal recorreu-se a uma curva de potência real associada a um aerogerador típico do mercado (Vestas V90-3.0 MW).

A segunda abordagem consistiu no estudo das relações entre os modos climáticos e a energia eólica efetivamente produzida em Portugal. Este exercício foi possibilitado pela existência de um registo da energia eólica produzida mensalmente, ainda que de menor extensão temporal tendo sido executado para o período disponível de 2008 a 2014.

Esta última abordagem (energia eólica) é de extrema utilidade na compreensão e enquadramento dos resultados da primeira abordagem (potência eólica). Com efeito as condições atmosféricas registadas por uma estação meteorológica podem não ser totalmente representativas da região em que se situa. Por outro lado o contexto de localização em que está instalada a maior parte da capacidade eólica portuguesa (região centro-norte de Portugal) pode implicar a intervenção de fatores mais específicos a cada um dos locais como seja a orografia da região na definição da variabilidade local.

O primeiro exercício foi executado para uma escala intrasazonal. A essa escala, a potência eólica de todas as localizações estudadas correlaciona-se significativamente com pelo menos um dos modos de variabilidade climática considerados, embora com considerável variação geográfica (NAO, -0.27 até -0.54) (EA, 0.28 até 0.51). Em algumas localizações, a potência correlaciona-se significativamente com dois ou com três dos modos climáticos estudados, implicando que nestas localizações a potência eólica depende da sua atuação simultânea.

O segundo exercício, relativo à energia eólica produzida em Portugal, foi executado para duas escalas temporais – escala intrasazonal e interanual. À escala intrasazonal, os modos climáticos NAO e EA correlacionam-se significativamente com a série temporal de energia produzida, com destaque para a EA. Os resultados observados nesta abordagem são coerentes com os resultados obtidos em algumas estações no primeiro exercício (potência eólica). À escala interanual, as correlações achadas são significativas e bastante elevadas para a EA (na ordem dos 0.90), em detrimento da NAO, que perde importância. Essas correlações mantêm-se elevadas e significativas para diferentes médias temporais (definições de Inverno), concedendo robustez aos resultados.

Os resultados de ambas as abordagens sugerem que tanto a NAO como a EA são padrões de circulação importantes para explicar uma parte relevante da variabilidade da energia eólica intrasazonal em Portugal, com destaque para a EA, sendo que a nível interanual esse modo climático aparenta ser bastante relevante individualmente.

Tendo em conta o aumento da capacidade instalada das energias de natureza renovável, este tipo de estudos tornam-se particularmente importantes. Isto deve-se ao facto de a variabilidade associada aos recursos energéticos renováveis constituir um dos principais desafios que os diferentes sistemas de produção, transporte e armazenamento de energia renovável enfrentam. As implicações que a variabilidade à escala intrasazonal e interanual apresentam à gestão humana assumem vários domínios de influência, nomeadamente: o compromisso do consumo elétrico; a viabilidade técnica do aproveitamento energético; o processo de gestão da rede; a instalação e manutenção de potência de reserva e acomodamento; o estabelecimento e funcionamento das relações técnicas e comerciais entre

países. Todos estes domínios são definidos em parte pela existência de variabilidade das fontes de energia renovável, ou especificamente, das variáveis a elas associadas.

A relação não-linear entre a potência elétrica de um aerogerador e a potência do recurso eólico constitui um fator que amplifica ou atenua a variabilidade do recurso. Da mesma forma, a localização de sistemas de energia renováveis, face à sensibilidade espacial dos impactos dos modos climáticos, constitui outro fator potencialmente ajustável. Isto indica possibilidades de adaptação humana à variabilidade de um dado recurso renovável energético o que, juntamente com o mencionado no parágrafo anterior, reforça a relevância do estudo dessa variabilidade.

5. Referências

- Alexander, M., Bladé, I., Newman, M., Lanzante, J., Lau, N., & Scott, J. (2002). The Atmospheric Bridge: The Influence of ENSO Teleconnections on Air–Sea Interaction over the Global Oceans. *Journal of Climate*, 2205–2231.
- Anthony G. Barnston and Robert E. Livezey, (1987): Classification, Seasonality and Persistence of Low-Frequency Atmospheric Circulation Patterns. *Mon. Wea. Rev.*, **115**, 1083–1126.
- Bierkens, M. F. P. and van Beek, L. P. H. (2009): Seasonal Predictability of European Discharge: NAO and Hydrological Response Time. *J. Hydrometeor*, **10**, 953–968.
- Boccard, N. (2009). Capacity factor of wind power realized values vs. estimates. *Energy Policy*, 2679–2688.
- Brands, S. , Manzanás, R. , Gutiérrez, J. M. and Cohen, J. (2012): Seasonal Predictability of Wintertime Precipitation in Europe Using the Snow Advance Index. *J. Climate*, **25**, 4023–4028.
- Brayshaw, D. J. *et al* (2011): The impact of large scale atmospheric circulation patterns on wind power generation and its potential predictability: A case study over the UK. *Science Direct* (Renewable Energy, Volume 36, Issue 8), DOI: 10.1016/j.renene.2011.01.025
- Brönnimann, S., Xoplaki, E., Casty, C., Pauling, A., & Luterbacher, J. (2006). ENSO influence on Europe during the last centuries. *Climate Dynamics*, 181–197.
- Cassou, C. (2008). Intraseasonal interaction between the Madden–Julian Oscillation and the North Atlantic Oscillation. *Nature*, 523–527.
- Christensen, J.H., K. Krishna Kumar, E. Aldrian, S.-I. An, I.F.A. Cavalcanti, M. de Castro, W. Dong, P. Goswami, A. Hall, J.K. Kanyanga, A. Kitoh, J. Kossin, N.-C. Lau, J. Renwick, D.B. Stephenson, S.-P. Xie and T. Zhou, **2013**: Climate Phenomena and their Relevance for Future Regional Climate Change. In: **Climate Change 2013: The Physical Science Basis**. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Climate Prediction Center - Northern Hemisphere Teleconnection Patterns. (n.d.). Retrieved December 10, 2014, from <http://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/teledoc/telecontents.shtml> (Acesso aos índices mensais de vários modos climáticos)
- Colantuono, G. *et al* (2014): Signature of the North Atlantic Oscillation on British solar radiation availability and PV potential: The winter zonal seesaw. *Science Direct* (Renewable Energy, Volume 107, Issue 8), DOI: 10.1016/j.renene.2011.01.025
- Comas-Bru L. ,McDermott F. (2013). Impacts of the EA and SCA patterns on the European twentiethcentury NAO–winter-climate relationships. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* DOI:10.1002/qj.2158
- Couto, A., Costa, P., Rodrigues, L., Lopes, V. and Estanqueiro, A. (2014): Impact of Weather Regimes on the Wind Power Ramp Forecast in Portugal. *Sustainable Energy, IEEE Transactions* (Volume:PP, Issue: 99)
- Czaja, A., Frankignoul, C. (2001): Observed Impact of Atlantic SST Anomalies on the North Atlantic Oscillation. *American Meteorological Society* (Journal of Climate, Volume 15, Pages 606 - 23)
- Deser, C., Alexander, M., Xie, S., & Phillips, A. (2009). Sea Surface Temperature Variability: Patterns and Mechanisms. *Annual Review of Marine Science*, 115–143.
- Dodet, G., Bertin, X., & Taborda, R. (2009). Wave climate variability in the North-East Atlantic Ocean over the last six decades. *Ocean Modelling*, 120–131.
- Energias De Portugal (EDP),. *Dados Operacionais Previsionais - 9M13*. 2014.

Energias Endógenas de Portugal (e2p) – Base de dados de fontes renováveis de energia. (Dezembro 2013). *Parques Eólicos em Portugal*.

Frankignoul, C. and Kestenare, E. (2005): Observed Atlantic SST Anomaly Impact on the NAO: An Update. *J. Climate*, **18**, 4089–4094.

García-Serrano, J. and Frankignoul, C. (2014): High predictability of the winter Euro–Atlantic climate from cryospheric variability *Nature Geoscience*, **7**, E1 (2014). doi:10.1038/ngeo2118

Hauke J., Kossowski T., Comparison of values of Pearson's and Spearman's correlation coefficient on the same sets of data. *Quaestiones Geographicae* 30(2), Bogucki Wydawnictwo Naukowe, Poznań 2011, pp. 87–93, 3 figs, 1 table.

Hermanson, L., & Sutton, R. (2009). Case studies in interannual to decadal climate predictability. *Climate Dynamics*, 1169–1189.

Hurrell, J. W. (2000): Climate: North Atlantic and Arctic Oscillation (NAO/AO)

Hurrell, J. (2003). An overview of the North Atlantic Oscillation. In *The North Atlantic oscillation: Climatic significance and environmental impact*. Washington, DC: American Geophysical Union.

Hurrell, J. W., Deser, C. (2009): North Atlantic climate variability: The role of the North Atlantic Oscillation. *Journal of Marine Systems*, Volume 79, Issues 3–4, 10 February 2010, Pages 231–244. DOI: 10.1016/j.jmarsys.2008.11.026

Iglesias I., Lorenzo M.N., Taboada J.J. (2014): Seasonal Predictability of the East Atlantic Pattern from Sea Surface Temperatures. *PLoS ONE* 9(1): e86439. doi:10.1371/journal.pone.0086439

International Research Institute for Climate and Society (Earth Institute – Columbia University (USA)). *Climatologies and Standardized Anomalies*. [ONLINE] Disponível em: <http://iridl.ldeo.columbia.edu/dochehelp/StatTutorial/Climatologies/#Stand> [03 Dezembro 14].

Jerez, S. and Trigo, R. M. (2013): Time-scale and extent at which large-scale circulation modes determine the wind and solar potential in the Iberian Peninsula *Environ. Res. Lett.* **8** 044035 DOI:10.1088/1748-9326/8/4/044035

Large-Scale Atmospheric Circulation Driving Extreme Climate Events in the Mediterranean and its Related Impacts. (2012). In P. Lionello (Ed.), *The Climate of the Mediterranean Region From the past to the future*. Burlington: Elsevier Science.

Lingemann et al, (2012). *Improved Procedures for Medium and Seasonal Water Level Forecast*. Report for European Commission Directorate-General for Energy and Transport., 2012. Web.

Miranda, T. (2011). *Tecnologias de Armazenamento de Energia – Identificação do Potencial e Aplicações*. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Dissertação para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Electrotécnica e de Computadores (*Major* em Energia).

Moore, G. W. K., Renfrew, I. A. and Pickart, R. S. (2013): Multidecadal Mobility of the North Atlantic Oscillation. *J. Climate*, **26**, 2453–2466.

Moore, G. W. K. and Renfrew, I. A. (2012), Cold European winters: interplay between the NAO and the East Atlantic mode. *Atmosph. Sci. Lett.*, **13**: 1–8. doi: 10.1002/asl.356

Murphy, S., & Washington, R. (2001). United Kingdom and Ireland precipitation variability and the North Atlantic sea-level pressure field. *International Journal of Climatology*, 939–959.

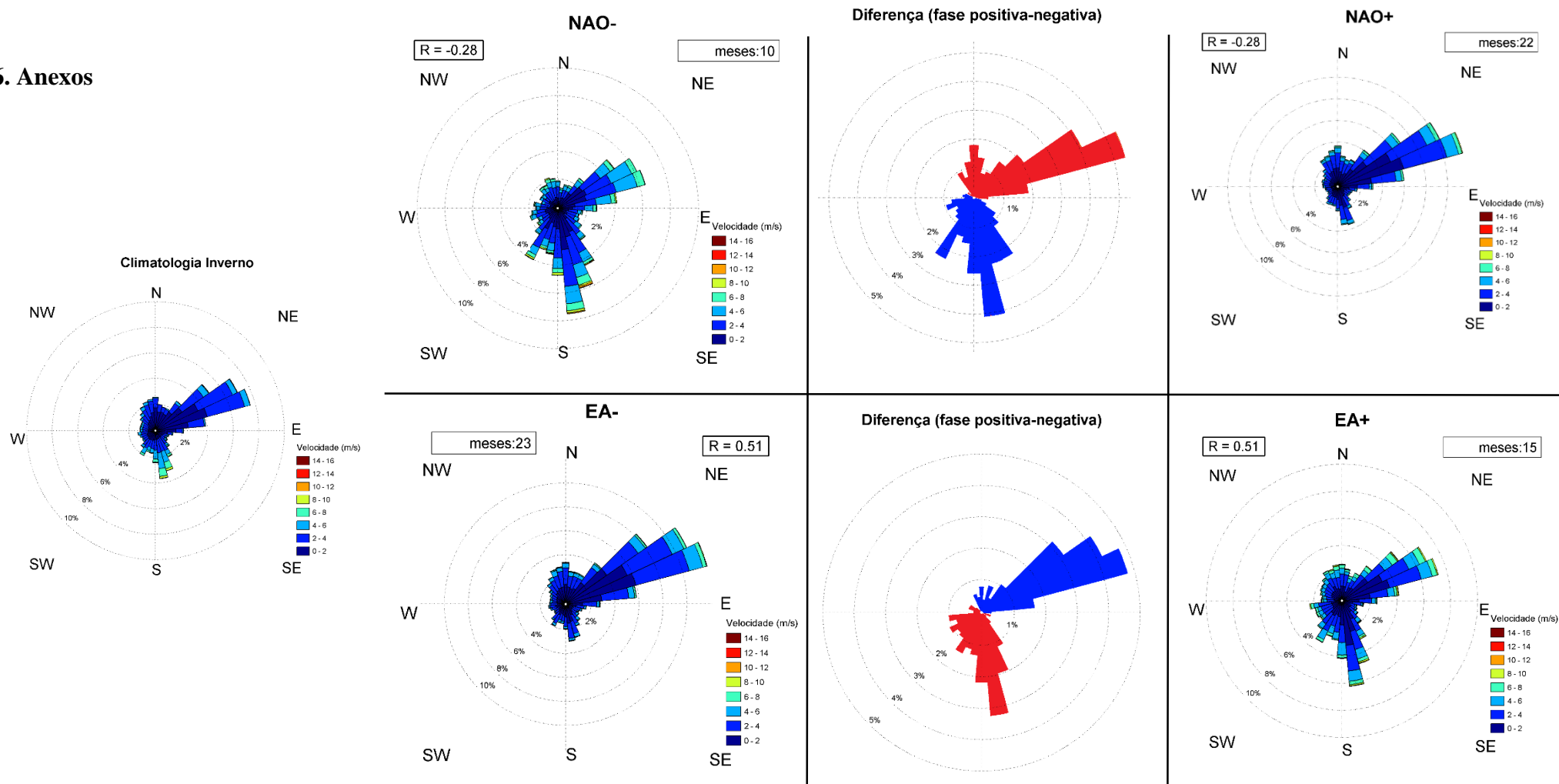
National Aeronautics and Space Administration (NASA). *NASA - What's the Difference Between Weather and Climate?*. [ONLINE] Disponível em: http://www.nasa.gov/mission_pages/noaa-n/climate/climate_weather.html. [03 Dezembro 14].

Ogi, M., Tachibana, Y., and Yamazaki, K. (2003). Impact of the wintertime North Atlantic Oscillation (NAO) on the summertime atmospheric circulation. *Geophysical Research Letters*.

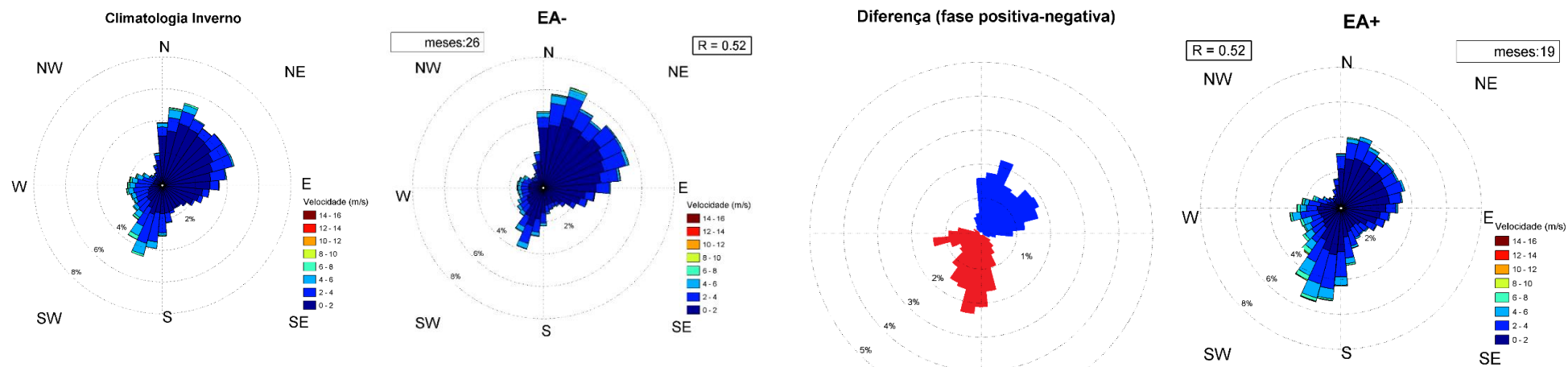
- Peings, Y., & Magnusdottir, G. (2014). Forcing of the wintertime atmospheric circulation by the multidecadal fluctuations of the North Atlantic ocean. *Environmental Research Letters*, 034018-034018.
- Peng, S. (2002). North Atlantic SST Forcing of the NAO and Relationships with Intrinsic Hemispheric Variability. *Geophysical Research Letters*.
- Polyakova, E. I., Journeel, A. G., Polyakov, I. V., and Bhatt U. S. (2006), Changing relationship between the North Atlantic Oscillation and key North Atlantic climate parameters, *Geophys. Res. Lett.*, 33, L03711, doi:10.1029/2005GL024573.
- Relations between Variability in the Mediterranean Region and Mid-latitude Variability (2006). In P. Lionello (Ed.), *Mediterranean climate variability*. Amsterdam: Elsevier.
- Rodwell, M., & Folland, C. (2002). Atlantic air–sea interaction and seasonal predictability. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1413-1443.
- S. Jerez, R. M. Trigo, S. M. Vicente-Serrano, D. Pozo-Vázquez, R. Lorente-Plazas, J. Lorenzo-Lacruz, F. Santos-Alamillos, and J. P. Montávez (2013): The Impact of the North Atlantic Oscillation on Renewable Energy Resources in Southwestern Europe. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, **52**, 2204–2225.
- Scaife, A. A., et al. (2014). Skillful long-range prediction of European and North American winters, *Geophys. Res. Lett.*, 41, 2514–2519, doi:10.1002/2014GL059637.
- Simões, T. (2004). *Base de Dados do Potencial Energético do Vento em Portugal – Metodologia e Desenvolvimento*. Faculdade de Engenharia da Universidade de Lisboa, Dissertação para a obtenção do grau de Mestre em Ciências e Engenharia da Terra.
- Šípek, V. (2013). The influence of large-scale climatic patterns on precipitation, temperature, and discharge in Czech river basins. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*.
- Sutton, R., & Hodson, D. (2003). Influence of the Ocean on North Atlantic Climate Variability 1871–1999. *Journal of Climate*, 3296-3313
- Trenberth, K.E., P.D. Jones, P. Ambenje, R. Bojariu, D. Easterling, A. Klein Tank, D. Parker, F. Rahimzadeh, J.A. Renwick, M. Rusticucci, B. Soden and P. Zhai, **2007**: Observations: Surface and Atmospheric Climate Change. In: **Climate Change 2007: The Physical Science Basis**. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Trigo R.M., Valente M.A., Trigo I.F., Miranda PM, Ramos AM, Paredes D, García-Herrera R. (2008): The impact of North Atlantic wind and cyclone trends on European precipitation and significant wave height in the Atlantic. *Ann N Y Acad Sci*. 2008 Dec;1146:212-34. DOI: 10.1196/annals.1446.014.
- Trigo, R. M., Pozo-Vázquez, D., Osborn, T., Castro-Díez, Y., Gámiz-Fortis, S., & Esteban-Parra, M. (2004). North Atlantic oscillation influence on precipitation, river flow and water resources in the Iberian Peninsula. *International Journal of Climatology*, 925-944.
- Vicente-Serrano SM, Trigo R. M. , López-Moreno JI, Liberato MLR and others (2011) Extreme winter precipitation in the Iberian Peninsula in 2010: anomalies, driving mechanisms and future projections. *Climate Research* 46:51-65
- Vitart, F., Robertson, A. W., Anderson, D. L. T. (2012). Subseasonal to Seasonal Prediction Project: bridging the gap between weather and climate.
- Wallace, J., & Gutzler, D. (1981). Teleconnections in the Geopotential Height Field during the Northern Hemisphere Winter. *Monthly Weather Review*, 784-812.
- Wilks, D. (2006). *Statistical methods in the atmospheric sciences* (2nd ed.). Amsterdam: Academic Press.

Wiser, R., Z. Yang, M. Hand, O. Hohmeyer, D. Infield, P. H. Jensen, V. Nikolaev, M. O'Malley, G. Sinden, A. Zervos, **2011: Wind Energy. In IPCC Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation** [O. Edenhofer, R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, K. Seyboth, P. Matschoss, S. Kadner, T. Zwickel, P. Eickemeier, G. Hansen, S. Schlömer, C. von Stechow (eds)], Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA

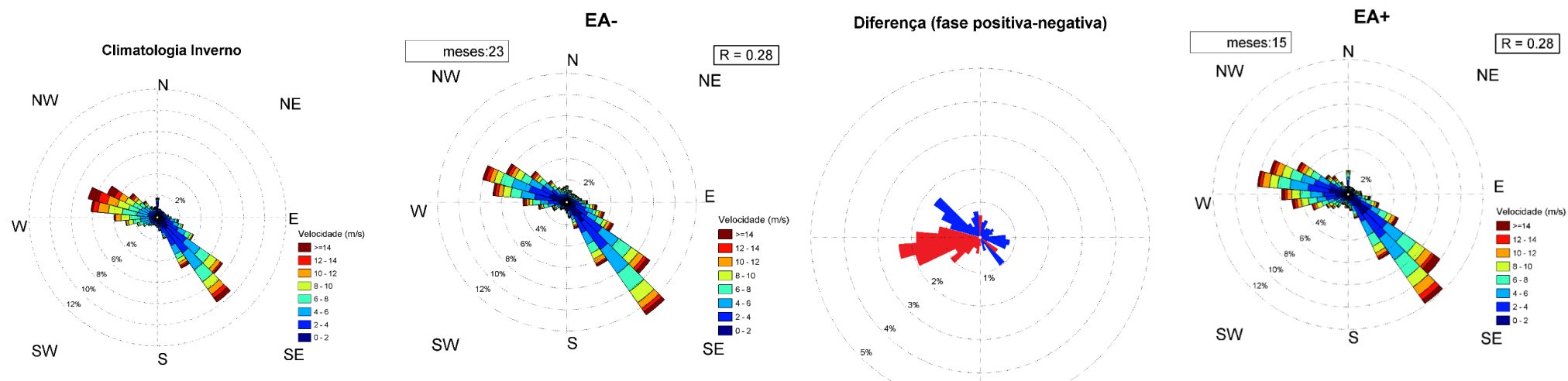
6. Anexos



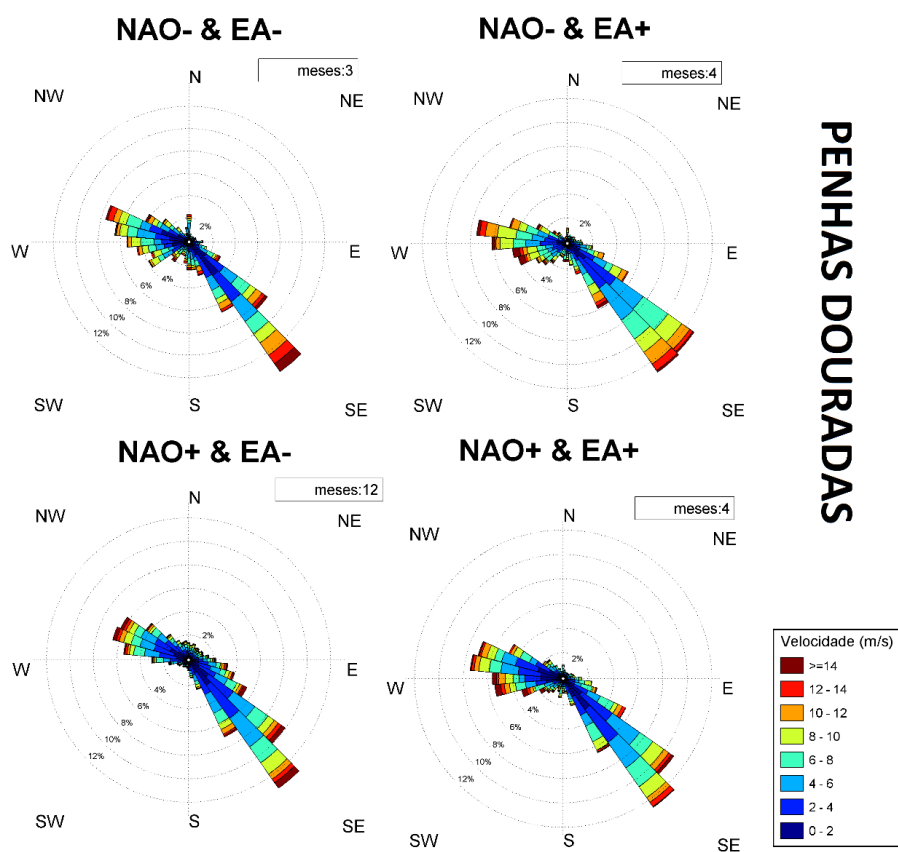
Histogramas angulares de frequência da direção do vento – para **Coimbra**. Climatologia da direção (histograma da esquerda, centrado verticalmente) e fases negativa e positiva da NAO (histogramas de cima) e da EA (baixo, por fase). Esses histogramas, além de apresentarem a frequência da direção do vento, discriminam também, através das várias cores, a frequência de cada escalão de intensidade de vento. Essa estratificação por cores não se aplica aos histogramas na coluna central, entre os histogramas das fases, que representam a diferença entre os histogramas da fase positiva e o histograma da fase negativa, no que toca à direção. Nesses histogramas centrais, o vermelho representa direções cuja frequência aumenta durante a fase positiva e a cor azul representa direções cuja frequência aumenta durante a fase negativa. Notar que nos histogramas da diferença de fases as linhas circulares de percentagem vão de 1 a 5 %, enquanto que em todos os outros histogramas, as linhas circulares de percentagem vão de 2 a 10 %. Período 2000 – 2012.



Histogramas angulares da frequência da direção do vento para *Vila Real*. Da esquerda para a direita: o primeiro histograma angular representa a climatologia da direção dos ventos no Inverno; o segundo histograma representa a fase negativa da EA; o terceiro histograma representa a diferença entre a fase positiva e a fase negativa; o quarto histograma representa as condições associadas à fase positiva da EA. Período 2001 – 2012.



Igual, relativo a *Penhas Douradas*. Período 2001 – 2012.



*Histogramas angulares da frequência da direção do vento para **Penhas Douradas**. Os diferentes histogramas são para cada combinação entre modos (NAO e EA) – indicado em cima de cada um. Período 2001-2012.*